ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET
TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE

WYDZIAŁ TECHNOLOGII I INŻYNIERII CHEMICZNEJ
Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska

KIERUNEK STUDIÓW: Inżynieria Chemiczna i Procesowa

ANDRZEJ GÜNTHER

Projekt kolumny rektyfikacyjnej do rozdziału mieszaniny benzen – toluen

Praca dyplomowa inżynierska wykonana
w Zakładzie Projektowania Systemów
i Optymalizacji Procesowej
pod kierunkiem:
dr inż. Sylwii Peryt – Stawiarskiej

SZCZECIN 2013

OŚWIADCZENIE AUTORA PRACY DYPLOMOWEJ

Niniejszym oświadczam, że przedłożona praca została wykonana pod kierunkiem opiekuna dr inż. Sylwii Peryt – Stawiarskiej; jest oryginalnym dziełem i nie była wcześniej przedkładana jako dyplomowa w żadnej innej procedurze nadania dyplomu. Praca ta nie narusza praw autorskich osób trzecich.

....

Podpis dyplomanta

STRESZCZENIE

Celem niniejszej pracy inżynierskiej było wykonanie obliczeń projektowych dla kolumny rektyfikacyjnej do rozdzielania mieszaniny dwuskładnikowej benzen–toluen. Praca składa się z sześciu części, wstępu, części referatowej, celu i zakresu pracy, części koncepcyjnej, części projektowej oraz zestawieniu wyników oraz wniosków. W ostatnich dwóch częściach pracy dyplomowej zawarta jest literatura cytowana oraz wykaz załączników.

W części referatowej na podstawie literatury naukowej zostały omówione podstawowe informacje na temat substancji rozdzielających, opracowano ogólne zagadnienia dotyczące różnych rodzajów procesów rektyfikacyjnych oraz aparatury, w której te procesy się prowadzi. Następnie omówiono metody wyznaczania półek teoretycznych w kolumnie różnymi metodami.

W następnych częściach omówiono cel i zakres pracy oraz na podstawie literatury [1] dobrane wszystkie założenia projektowe.

W części projektowej przedstawiono tok obliczeń dla różnych wariantów. Część ta zawiera wszystkie niezbędne równania do obliczeń projektowych. Praca została zakończona podsumowaniem oraz wnioskami.

Na końcu pracy zostały zamieszczone spis literatury cytowanej oraz załączniki

SPIS TREŚCI

SPIS OZNACZEŃ

A - składnik bardziej lotny

B - składnik mniej lotny

α - współczynnik lotności względnej [–]

x_W - udział molowy składnika A w cieczy wyczerpanej $\left[\frac{kmol_A}{kmol}\right]$

x_D - udział molowy składnika A w destylacie $\left[\frac{kmol_A}{kmol}\right]$

x_S - udział molowy składnika A w surówce $\left[\frac{kmol_A}{kmol}\right]$

S - strumień dostarczanej surówki $\left[\frac{kmol}{h}\right]$

D - strumień odbieranego destylatu $\left[\frac{kmol}{h}\right]$

W - strumień cieczy wyczerpanej $\left[\frac{kmol}{h}\right]$

L - strumień zawracanej cieczy w górnej części kolumny rektyfikacyjnej $\left[\frac{kmol}{h}\right]$

L'- strumień zawracanej cieczy w dolnej części kolumny rektyfikacyjnej $\left[\frac{kmol}{h}\right]$

V - strumień pary w górnej części kolumny rektyfikacyjnej $\left[\frac{kmol}{h}\right]$

V' - strumień pary w dolnej części kolumny rektyfikacyjnej $\left[\frac{kmol}{h}\right]$

Ψ_{min} - minimalny stopień orosienia w górnej części kolumny

Ψ - stopień orosienia w górnej części kolumny

Ψ' - stopień orosienia w dolnej części kolumny

E_K - sprawność ogólna kolumny rektyfikacyjnej

z - optymalny współczynnik nadmiaru orosienia

q - parametr teoretyczny mówiący o stanie surówki

N_{tg} - teoretyczna liczba półek w górnej części kolumny rektyfikacyjnej

N_{td} - teoretyczna liczba półek w dolnej części kolumny rektyfikacyjnej

N_t - teoretyczna liczba półek w całej kolumnie rektyfikacyjnej

N_{rz} - rzeczywista liczba półek w całej kolumnie rektyfikacyjnej

Spis indeksów

A,B – odnoszą się do składników: A, B

I, II, – odnoszą się do obliczeń dla różnych wariantów

WYKAZ TABEL I RYSUNKÓW

I. WSTĘP

Destylacja oraz rektyfikacja należą do operacji jednostkowych, które mają za zadanie rozdzielenie surówki – mieszaniny dwu i więcej składnikowej – na czyste składniki. Wraz z rozwojem chemii przemysłowej procesy te stosowane były głównie w przemyśle spożywczym. Największy rozwój w tym kierunku mamy dzięki przemysłowi naftowemu oraz syntezom organicznym, w których pracują urządzenia destylacyjne i rektyfikacyjne [2,3].

Rektyfikacja jest szeroko stosowana w zakładach petrochemicznych zwanych rafineryjnymi i ma bardzo duże znaczenie dla przemysłu chemicznego. Stosuje się ją, aby uzyskać lepsze rozdzielenie składników na produkty czystsze niż w przypadku nieopłacalnej kilkukrotnej destylacji.

W niniejszej pracy inżynierskiej zostały omówione ogólne zagadnienia ściśle związane z procesami rektyfikacyjnymi. Również zostały wykonane obliczenia projektowe kolumny rektyfikacyjnej do rozdzielania mieszaniny dwuskładnikowej benzen–toluen. Wybór aparatów służących do procesów rektyfikacji jak i metod wyznaczenia ilości półek teoretycznych w kolumnie rektyfikacyjnej jest bardzo duży.

W całej pracy zakłada się, że dana mieszanina dwuskładnikowa składa się ze składników A i B, gdzie składnik A jest bardziej lotny.

II. CZĘŚĆ REFERATOWA

2.1. Charakterystyka związków

2.1.1. Benzen

Benzen jest związkiem organicznym, najprostszym węglowodorem aromatycznym należący do grupy arenów. W 1865 r. Kekulé zaproponował dla benzenu strukturę cykliczną, w której atomy węgla były połączone naprzemiennymi pojedynczymi i podwójnymi wiązaniami. W 1874 r. Ladenburg udowodnił doświadczalnie, że wszystkie atomy wodoru w cząsteczce benzenu są równocenne. W przemyśle chemicznym jest stosowany w wielu syntezach jako surowiec lub jako rozpuszczalnik. Tanim surowcem jest benzen techniczny, tak zwany benzol, o temperaturze wrzenia 80-100°C. Taka substancja zawiera 70-80% czystego benzenu, natomiast pozostałą część stanowi mieszanina toluenu, ksylenu i innych zanieczyszczeń [4].

Właściwości fizyczne i chemiczne

Benzen w temperaturze pokojowej jest bezbarwną cieczą o charakterystycznym zapachu. Ze względu na swoją budowę jego rozpuszczalność w wodzie jest bardzo słaba. Bardzo dobrze w rozpuszczalnikach organicznych jak również sam jest doskonałym rozpuszczalnikiem dla tłuszczów, wosków i innych niepolarnych związków chemicznych. Jest cieczą łatwopalną i ma właściwości wybuchowe.

Benzen należy do związków trwałych chemicznie, nie ulega łatwo reakcjom addycji. Benzen ulega wszystkim reakcjom spalania. Spala się kopcącym płomieniem wydzielając przy tym ciepło rzędu 9479 kcal/kg. Związek ten posiada silne właściwości rakotwórcze [4].

2.1.2 Toluen

Toluen (metylobenzen) jest dwukrotnie mniej lotną cieczą od benzenu. Jest także związkiem organicznym należący do grupy węglowodorów aromatycznych. Warto dodać, że toluen został odkryty przez polskiego chemika Filipa Waltera. Toluen jest surowcem używanym w wielu dziedzinach przemysłu organicznego, na przykład jako

rozpuszczalnik farb czy lakierów, do produkcji materiałów wybuchowych, barwników organicznych, używany do produkcji detergentów, żelów i farb do włosów, czy zastosowanie w przemyśle farmaceutycznym [w2-w3].

Toluen otrzymuje się na drodze suchej destylacji węgla. Można go także otrzymać za pomocą frakcyjnej destylacji smoły pogazowej, czy poprzez pirogeniczny rozkład ropy naftowej. Tanim surowcem jest toluen techniczny. W toluenie technicznym obecne są domieszki nieznacznych ilości benzenu i ksylenu [4].

Właściwości fizyczne i chemiczne

Metylobenzen jest cieczą bezbarwną o intensywnym charakterystycznym zapachu. Toluen bardzo słabo rozpuszcza się w wodzie, można przyjąć, że nie miesza się z wodą. Jest cieczą łatwopalną.

2.1.3 Porównanie właściwości fizykochemicznych benzenu i toluenu

W Tabeli 1 zostały przedstawione właściwości fizykochemiczne benzenu i toluenu.

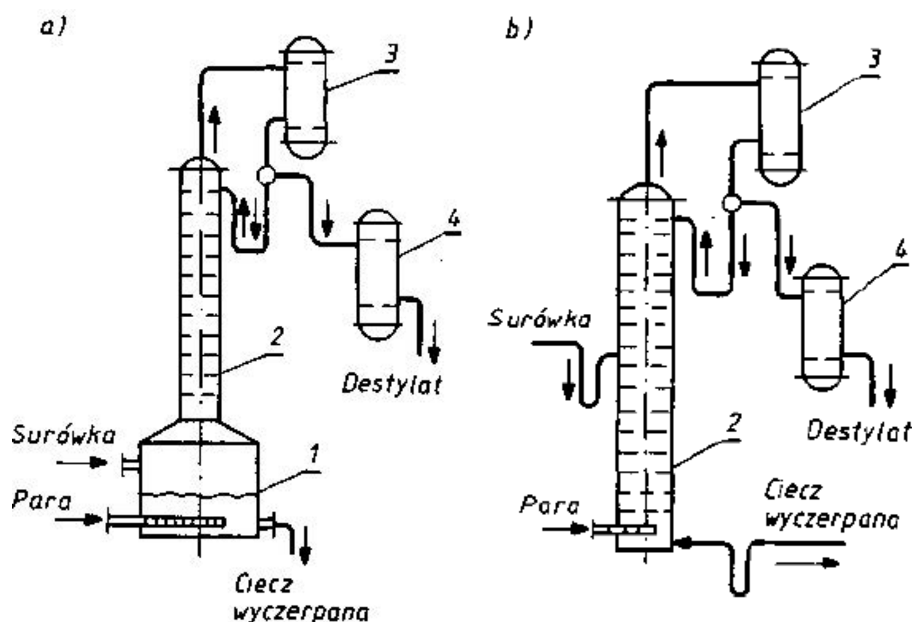
Nazwa związku	**Benzen**	**Toluen**
Wzór sumaryczny Budowa cząsteczki	C_6H_6	$C_6H_5CH_3$ CH_3
Masa molowa	78,11 [g/mol]	92,14 [g/mol]
Gęstość i stan skupienia w temperaturze 20°C	0,874 [g/cm^3] ciecz	0,873 [g/cm^3] ciecz
Rozpuszczalność w wodzie w temp. 20°C	1,79 [g/dm^3]	Bardzo słaba 0,5348 [g/dm^3]
Temperatura topnienia	5,5°C	-94,991°C
Temperatura wrzenia	80°C	110,63°C
Temperatura krytyczna	288,9°C	318,6°C
Ciśnienie krytyczne	48,6 [MPa]	4,1 [MPa]
Dawka śmiertelna LD_{50}	48 [mg/kg ciała]	636 [mg/kg ciała]

Tabela 1. Zestawienie właściwości fizyko-chemicznych oraz toksykologicznych [6,w1-w2].

2.2. Rektyfikacja kolumnowa oraz jej podział

2.2.1 Czym jest rektyfikacja

Rektyfikacja (jak również destylacja) należą do operacji jednostkowych, których zadanie polega na rozdzieleniu roztworu rektyfikacyjnego (surówki), który może zawierać dwa lub więcej składników w mieszaninie. Rektyfikacja (wielokrotna destylacja) jest procesem rozdzielania cieczy lub pary, który polega na przeciwprądowym kontaktowaniu się cieczy i pary przy równoczesnej wymianie ciepła i masy. Proces ten prowadzi się w aparatach nazywanych *kolumnami rektyfikacyjnymi,* które dzielimy na kolumny rektyfikacyjne o działaniu ciągłym (Rys. 2.1a) i okresowym (Rys. 2.1b). W rektyfikacji wędrówka rozdzielających się składników z cieczy do oparów i przeciwnie jest wielokrotna. Spływająca w dół ciecz nazywana flegmą, wzbogaca się w składnik mniej lotny, a opary wędrujące ku górze w składnik bardziej lotny [2,3,5,7].



Rys. 2.1. Kolumny rektyfikacyjne: a) do rektyfikacji okresowej, b) do rektyfikacji ciągłej. (1-kocioł, 2-kolumna, 3-deflegmator, 4-kondesnator)

Na Rys. 2.1, opary, które odpływają z górnej części kolumny rektyfikacyjnej (2), kierowane są do kondensatora, nazywanego również deflegmatorem (3). W nim opary częściowo lub całkowicie są skraplane. Część kondensatu jest zawracana z powrotem do kolumny (2), aby utrzymać ciągłość kontaktu oparów i cieczy. Produkt, który jest

odbierany w dolnej części kolumny stanowi ciecz wyczerpaną, a pozostała część stanowi główny produkt rozdziału zwany destylatem.

Destylacja prosta umożliwia jedynie ograniczony rozdział mieszaniny na składniki, (destylat i ciecz wyczerpana), a ich stopień czystości zależy od tego, jak linia równowagi odbiega od przekątnej kwadratu stężeń $x - y$. Dlatego, aby uzyskać lepszy stopień rozdziału oraz czystsze składniki, należy zastosować proces rektyfikacji [2,5,7].

Proces rektyfikacji składa się z następujących etapów [1]:

a) wytworzenie oparów (gazów) kierowanych do góry kolumny rektyfikacyjnej, poprzez podgrzanie mieszaniny w kotle,

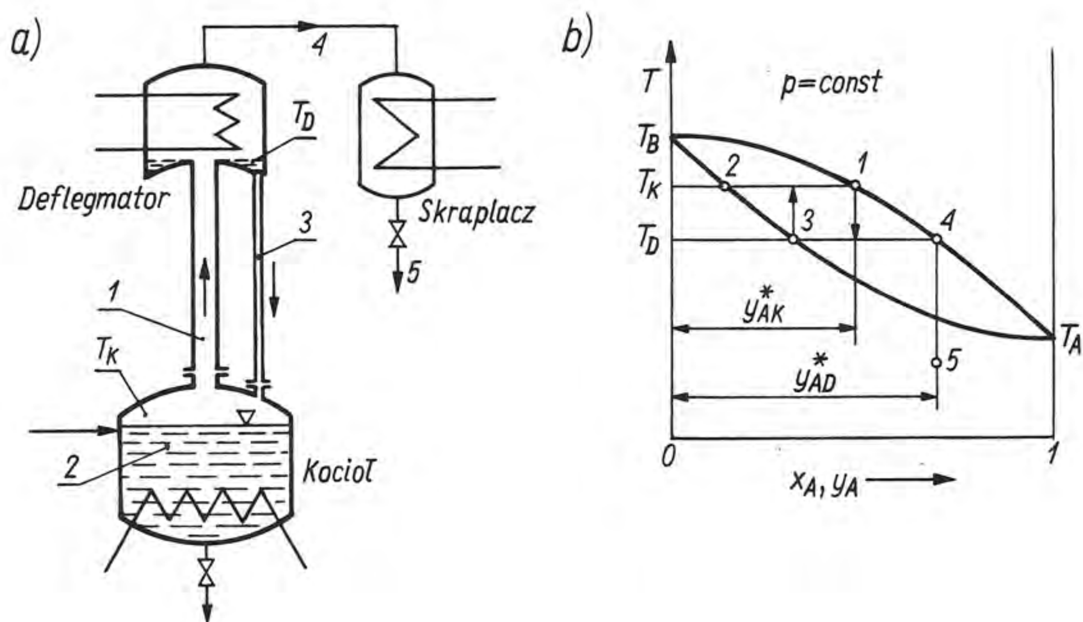
b) zapewnienie intensywnego kontaktu obu faz, w kolumnach rektyfikacyjnych półkowych lub wypełnionych,

c) kondensowanie się części oparów na szczycie kolumny oraz częściowe zawracanie skroplin do kolumny, aby ją zasilić cieczą.

2.2.2 Rektyfikacja mieszanin dwuskładnikowych

2.2.2.1 Destylacja z deflegmatorem

Na rysunku 2.2a, jest przedstawiona instalacja pośrednią między kolumną rektyfikacyjną a destylacją prostą jest destylacja z deflegmatorem. Deflegmator jest urządzeniem, które działaniem przypomina kolumnę rektyfikacyjną. Zwiększa ono efektywność procesu destylacji.



Rys. 2.2. Aparatura destylacyjna z deflegmacją a) schemat aparatury, b) interpretacja działania na wykresie składu [2]

Na Rys. 2.2b, przedstawiono graficznie działanie aparatury na wykresie składu. Punkt 1, odpowiada stężeniu oparów z kotła, a punkt 2 stężeniu pozostałości w samym kotle. W oparach z deflegmatora stężenie składnika bardziej lotnego jest w dużym stopniu większe od oparów w kotle $y_{AD} > y_{AK}$. Jest tak, gdy w kotle i w deflegmatorze ustalą się stany równowagi dla dwóch różnych temperatur T_K i T_D. W punkcie 3, skropliny zawraca się z deflegmatora do kotła.

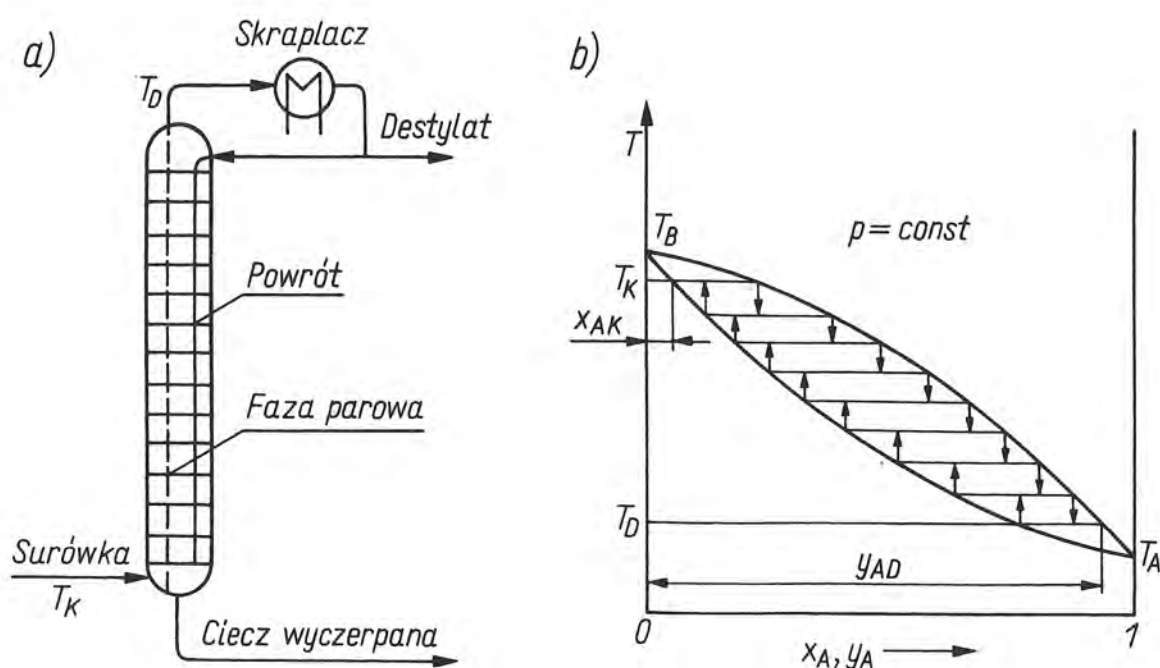
Proces destylacji z deflegmacją nadaje się tylko do rozdziału związków o znacząco różnych temperaturach wrzenia, co także nie daje gwarancji otrzymania czystych produktów (rozdzielonych na składnik A i składnik B), ponieważ często taka destylacja jest utrudniona z powodu tworzenia się mieszanin roztworów azeotropowych. Oznacza to, że skład destylatu będzie zbliżony do składu cieczy wyczerpanej [2,3].

2.2.2.2 Rektyfikacja adiabatyczna ciągła z częścią wzmacniającą

Aby otrzymać lepszy rozdział mieszaniny rektyfikacyjnej na składniki o dużym stopniu czystości trzeba użyć rozdziału w kolumnie rektyfikacyjnej (Rys. 2.3).

Na rysunku 2.3 jest przedstawiono schemat instalacji rektyfikacyjnej zawierający tylko część wzmacniającą, która umiejscowiona jest nad miejscem doprowadzania surówki.

Po napełnieniu surówką wyposażonego w płaszcz lub wężownice – przeprowadza się proces rektyfikacji. Po zakończeniu procesu mieszanina rozdzielona jest na składniki. W kotle znajduje się składnik mniej lotny z innymi zanieczyszczeniami obecnymi w surówce. Oddzielony składnik w dole kolumny to ciecz wyczerpana. Ciecz wyczerpana jest wzbogacona w składnik mniej lotny (B), ale mimo tego składnik B nie nadaje się do bezpośredniego użycia, ponieważ nie jest wystarczająco czysty. Po opróżnieniu z kotła cieczy wyczerpanej i napełnieniu nową porcją surówki, proces powtarza się. W górnej części kolumny otrzymuje się główny produkt, składnik bardziej lotny (A), o wysokim stopniu czystości [2].



Rys. 2.3. Rektyfikacja ciągła z częścią wzmacniającą: a) schemat aparatury, b) interpretacja działania na wykresie składu [2]

Na wykresie składu (Rys. 2.3b) przedstawiono działanie kolumny rektyfikacyjnej. Przyjęto założenie, że temperatura ustala się przy każdym stopniu w kolumnie, przez co ustalają się kolejne stany równowagi. Ze stopnia na stopień można śledzić wędrówkę

opadów wzbogacanych w składnik lżejszy A, i zarazem zubożenie tego składnika w fazie ciekłej, która wzbogaca się w składnik cięższy B.

Aby otrzymać bardzo czyste składniki trzeba rektyfikację prowadzić w kolumnie zawierającej dużo stopni. Do wytworzenia dużej turbulencji przepływu oraz w celu zmaksymalizowania powierzchni kontaktu obu faz stosuje się półki lub wypełnienia. Intensyfikuje to proces wymiany masy i ciepła. Produkt główny (destylat) jest częściowo odbierany ze skraplacza, reszta jest zawracana na szczyt aparatu (orosienie, refluks).

Ogólna zasada przeprowadzania procesu rektyfikacji w aparaturze z częścią wzmacniającą polega na:

- odparowaniu części mieszaniny rektyfikacyjnej (surówki),
- wyprowadzeniu ze szczytu kolumny fazy parowej oraz skropleniu jej w kondensatorze w destylat,
- recyklu części destylatu na szczyt kolumny. Ciecz płynie w aparacie spływem grawitacyjnym w dół,
- zapewnieniu jak najlepszego kontaktu obu faz we wzajemnym przepływie.

2.3. Aparatura stosowana w procesie rektyfikacji

W aparatach nazywanych kolumnami prowadzi się różne procesy przemysłowe, nie tylko rektyfikacji, ale też procesy absorpcji i desorpcji. W budowie aparatów do powyższych procesów nie ma dużych różnic, a ich nazwy biorą się z kształtu danego aparatu.

2.3.1 Aparatura kolumnowa

Aparaty kolumnowe przeznaczone do kontaktu oparów (gazu) i cieczy można podzielić na trzy grupy:

- stopniowane,
- różniczkowe – ciągłe,
- pseudo-równowagowe – stopniowe.

i. Kolumna stopniowa

W tego rodzaju kolumnach proces wymiany masy zachodzi w mieszaninie piany dynamicznej na każdej z półek, gdzie każda półka spełnia warunek równowagi i stanowi stopień równowagowy. Oddzielny przepływ cieczy i oparów eliminują niekorzystne zjawiska recyrkulacji i bocznikowania strumieni rozdzielanych cieczy. Przelewy nie tylko służą do spływu grawitacyjnego cieczy na dolną półkę, ale ograniczają porywanie i unoszenie cieczy na górną półkę .

ii. Kolumna różniczkowa – ciągła

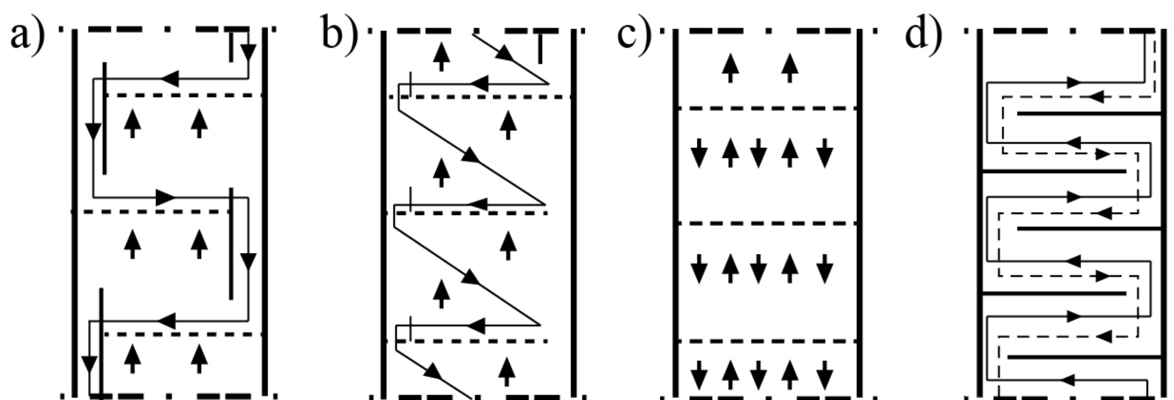
Te kolumny mają wewnątrz wypełnienie, które jest usypane luźno, przypadkowo lub według określonych wzorów. Złoże (wypełnienie) oparte jest na ruszcie podtrzymującym oraz zwilżane cieczą za pomocą urządzeń zraszających. Przepływające przeciwprądowo przez warstwę złoża ciecz i gaz mają zapewnioną dużą powierzchnię kontaktu, który jest ciągły i przebiega wzdłuż całej kolumny. Takie złoże może być naturalne lub sztuczne.

iii. Kolumna pseudo-równowagowa – stopniowa

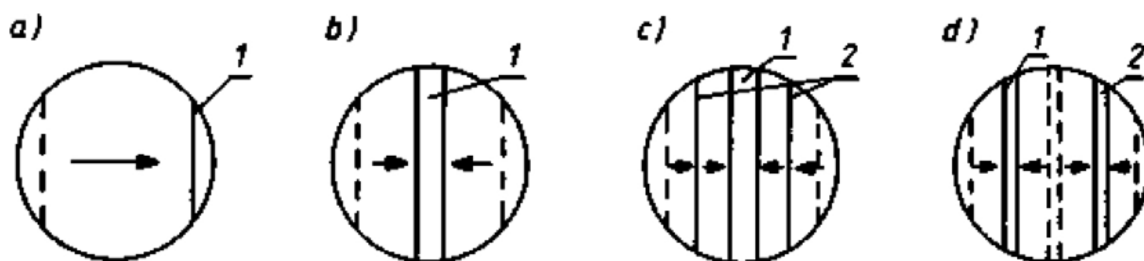
Tutaj wymiana masy zachodzi nie tylko na półkach, ale również w przestrzeni między półkowej.

2.3.2 Kolumny półkowe

W przemyśle chemicznym konstrukcje półek w kolumnach są przeróżne. Budowa takiej kolumny opiera się na wbudowaniu w środku szeregu półek (stopni), które umieszczone są jedna nad drugą. Półki wykonane są ze stali odpornej na korozję. Na rysunku 2.4 pokazano schematy jak mogą przepływać ciecz i opary w obrębie półek w kolumnie rektyfikacyjnej.



Rys. 2.4. Rodzaje półek sitowych ze schematem przepływu obu faz na półkach: a, b) przepływ krzyżowy, c, d) przepływ przeciwprądowy

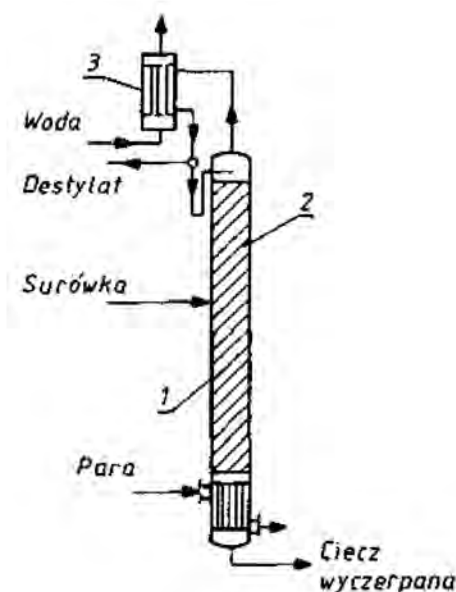


Rys. 2.5. Schematy przepływu cieczy na półkach: a) krzyżowy, b) przelew podwójny, c) przelew podwójny kaskadowy, d) przelew poczwórny; 1 – przelewy, 2 – progi spiętrzające [7]

Półki sitowe o krzyżowym ruchu faz należą do najczęściej stosowanych (rys. 2.4a,b). W zależności od ilości przepuszczanego strumienia cieczy dobiera się różne rodzaje półek. Dla małych strumieni cieczy używa się półki z przelewem rewersyjnym, w której półka dzielona jest na dwie części za pomocą przegrody, natomiast przelewy umiejscowione są po stronie półki. Natomiast dla dużych strumieni cieczy stosuje się półki z wieloma strumieniami przepływu oraz kilkoma przelewami (Rys. 2.5) [2,7].

3.1.6 Kolumny z wypełnieniem

Do najczęściej używanych kolumn należą kolumny z wypełnieniem, w których różnego rodzaju wypełnienie spełnia rolę półek. Ten rodzaj kolumn zalecany jest szczególnie do rektyfikacji próżniowej dla mieszanin wrażliwych na wysokie temperatury oraz destylacji w warunkach normalnych.

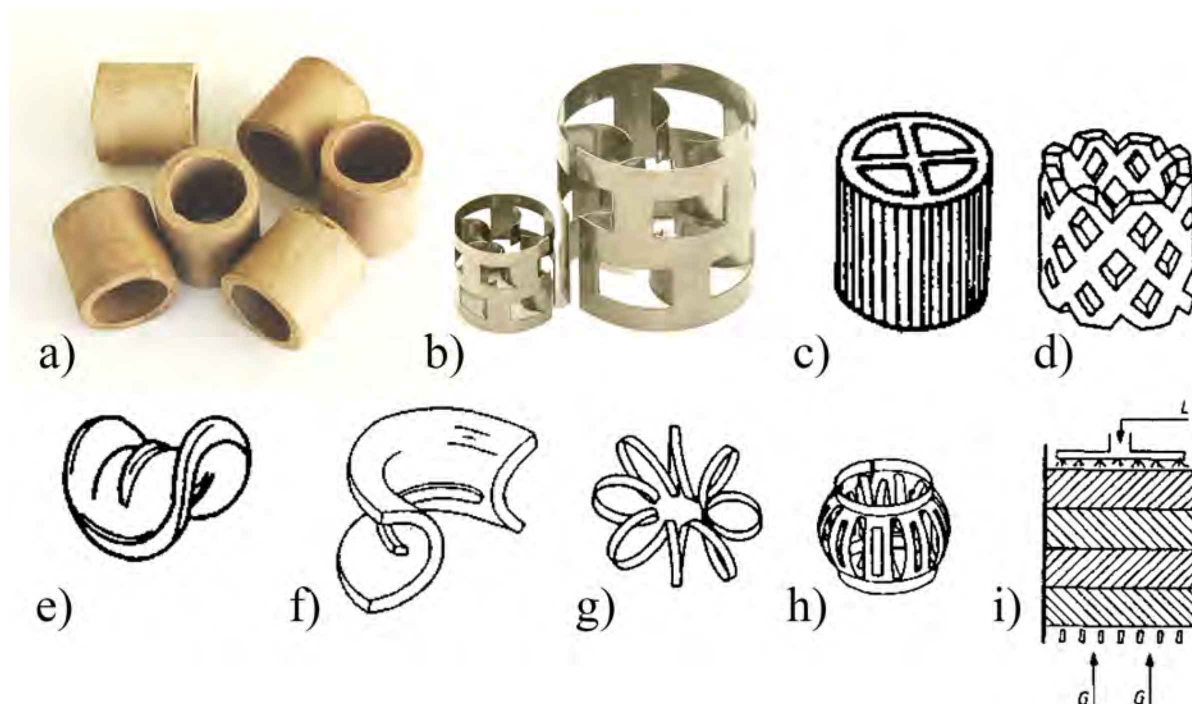


Rys. 2.5. Schemat kolumny z wypełnieniem:

1 – kolumna, 2 – wypełnienie (złoże),

3 – deflegmator [7]

Wypełnienie – na przykład pierścienie i siodełka, (Rys. 2.7) – mogą być metalowe, ceramiczne, wykonane z grafitu, wszelkiego rodzaju tworzyw sztucznych, naturalne. W zależności od właściwości mieszaniny rektyfikacyjnej i temperatury dobiera się odpowiednie wypełnienie w kolumnie.

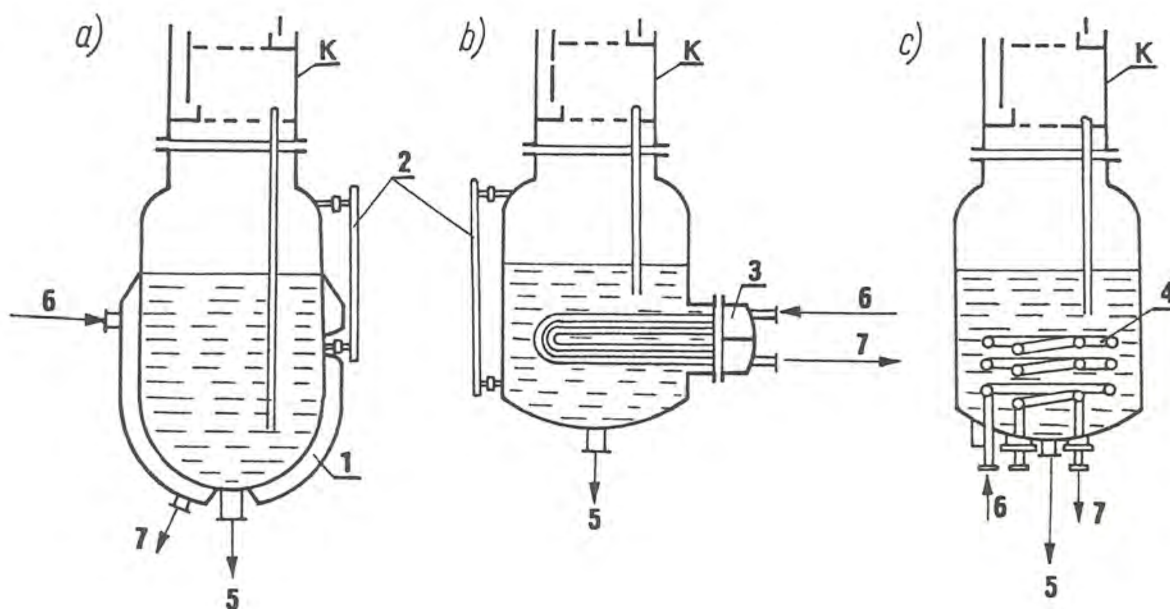


Rys. 2,7. Elementy wypełnień kolumny; pierścienie: a) Raschiga, b) Palla, c) Lessinga, d) Intos; siodełka: e) Berla, f) Intalox; wypełnienie: g) Tellerette, h) Top-Pak, i) strukturalne [2,7]

Wypełnienie ceramiczne znajduje zastosowanie dla wszystkich cieczy korozyjnych. Jednak nie nadaje się do procesu z cieczami alkalicznymi, ponieważ zachodzi reakcja chemiczna pomiędzy grupą (grupami) hydroksylową (-OH), a krzemem (Si), głównym składnikiem porcelany. Ceramiczne wyroby nie są zbytnio odporne chemicznie, ale mają bardzo dużą wytrzymałość termiczną – do ok. 1400°C [2,7,8].

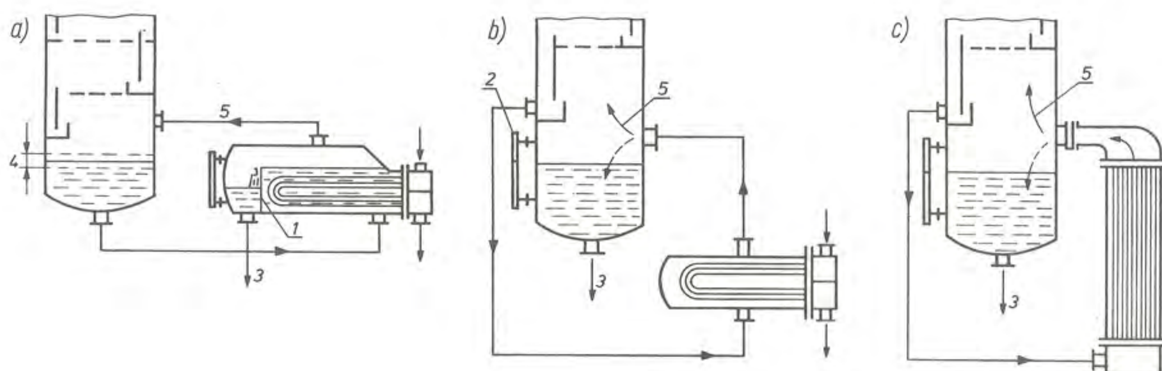
2.3.4 Wyparki destylacyjne

Wyparki destylacyjne mogą być umieszczone w dolnej części kolumn rektyfikacyjnych, w dolnej części odpędowej lub też na zewnątrz.



Rys. 2.8. Wyparki destylacyjne wbudowane w część odpędową kolumny: a) z płaszczem grzejnym, b) z wkładem grzejnym, c) z wężownicą grzejną; K – kolumna, 1 – płaszcz grzejny, 2 – poziomowskaz, 3 – wkład grzejny, 4 – wężownica grzejna, 5 – ciecz wyczerpana, 6 – wlot pary grzejnej, 7 – wylot skroplin [2]

Wyparki te można ogrzewać np., gorącą wodą, parą wodną, spalinami, itp. Na rysunkach 2.8 i 2.9 zilustrowano kształty na ogół używanych wyparek do kolumn destylacyjnych i rektyfikacyjnych. Do mniejszych instalacji zaleca się stosowanie wyparek wbudowanych w kolumny. Aby uniknąć zjawiska korozji dno kolumny jest zabezpieczane za pomocą emaliowania lub platerowania.



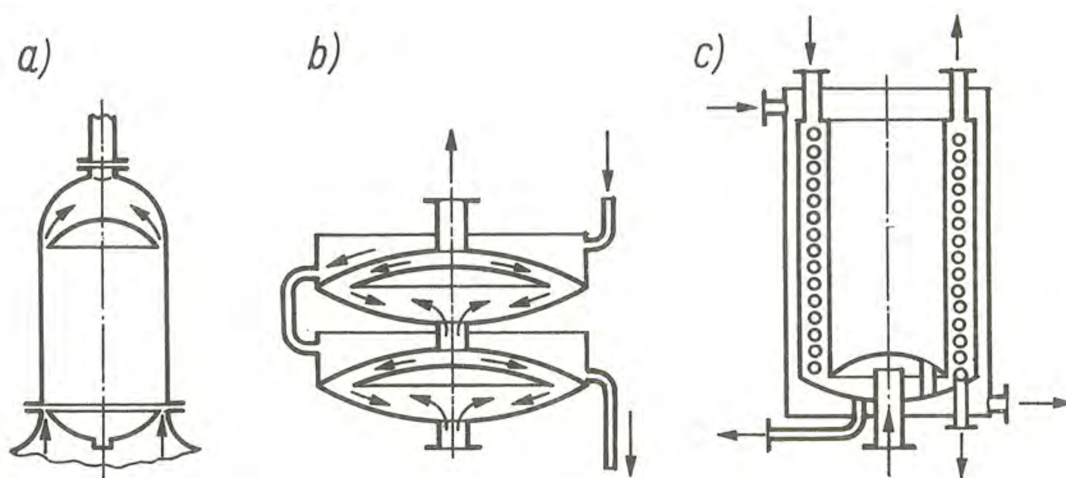
Rys. 2.9. Wyparki kolumn destylacyjnych umieszczonych na zewnątrz kolumny; a) pozioma, b) pozioma zalana cieczą, c) pionowa; 1 – krawędź przelewu, 2 – poziomowskaz, 3 – ciecz wyczerpana, 4 – spiętrzenie cieczy, 5 – faza parowa [2]

Szczególnie przydatna do pracy pod próżnią jest wyparka pozioma (Rys. 2.9a), która wyróżnia się najniższym spadkiem ciśnienia. Tanim zastosowaniem może być wyparka w całości zalana cieczą (Rys. 2.9b). Wadą jest w tym przypadku większy opór przepływu cieczy. Wyparki umieszczone pionowo (Rys. 2.9c) mają zastosowanie, gdy rektyfikowana mieszanina wydziela podczas procesu osady. W takim przypadku trzeba dokładnie wyczyścić powierzchnię grzejną [2].

W praktyce przemysłowej powyższe rozwiązania konstrukcyjne są dopasowane również w zależności od lepkości cieczy. Do cieczy o dużej lepkości podłącza się dodatkowo pompy certyfikacyjne.

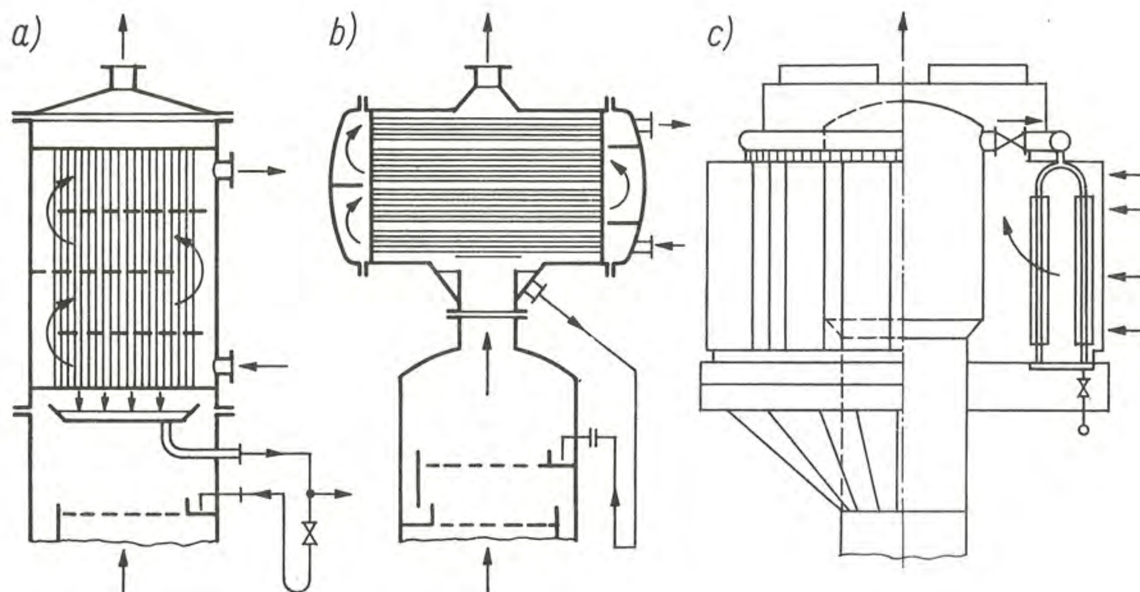
2.3.5 Deflegmatory i skraplacze

Deflegmatory zazwyczaj umieszczone są na szczycie kolumny. Ich zadaniem jest całkowite lub częściowe wykroplenie fazy parowej. Deflegmatory przede wszystkim stosuje się w instalacjach do destylacji (Rys. 2.10).



Rys. 2.10. Deflegmatory stosowane w instalacjach destylacyjnych: a) deflegmator cylindryczny chłodzony powietrzem, b) deflegmator soczewkowy, c) deflegmator z wężownicą chłodzącą [2]

Skraplaczy używa się przy większych instalacjach – w starszych rozwiązaniach konstrukcyjnych na szczycie kolumny (Rys. 2.10), a w nowszych już oddzielnie. Stosowanie skraplaczy na szczycie kolumny wiąże się z problemem ich osadzeni. Nie jest to łatwe w montażu i obsłudze. Chłodzenie odbywa się za pomocą powietrza, które jest wdmuchiwane wentylatorami z zewnątrz na rurki żebrowane. Tego typu skraplacze są dwukrotnie cięższe od chłodzonych wodą oraz tańsze [2,7].

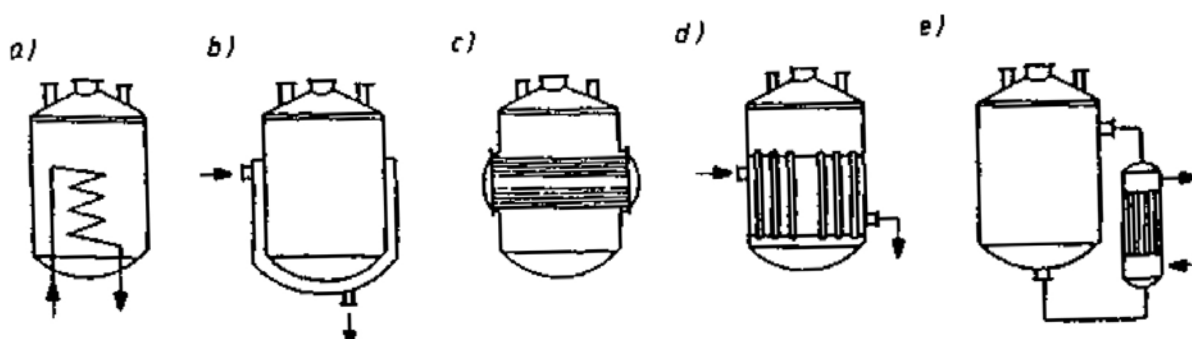


Rys. 2.11. Skraplacze ustawione na szczycie kolumn destylacyjnych; a) zupełny – pionowy, b) częściowy – poziomy, c) powietrzny [2]

2.3.6 Kotły destylacyjne

Zadaniem kotłów destylacyjnych (kubów) jest doprowadzenie mieszaniny (surówki) do stanu wrzenia. W zależności od prowadzonego procesu dobiera się rodzaj kotła, który jest wyposażony w [7]:

- wężownice,
- płaszcz grzejny,
- zagrzewacz, którym jest wymiennik ciepła płaszczowo-rurowy.



Rys. 2.12. Kotły destylacyjne wyposażone w: a) wężownicę wewnętrzną, b) płaszcz grzejny, c, d) komory grzejne rurkowe, pozioma i pionowa, c) z wymiennikiem zewnętrznym [7]

2.4. Metody wyznaczania liczby półek teoretycznych

Półka teoretyczna (inaczej stopień teoretyczny lub półka Petersa) musi być tak skonstruowana, aby zapewniała całkowite wymieszanie cieczy, wyrównanie temperatur oraz, co najważniejsze musi na niej dochodzić do osiągnięcia stanu równowagi międzyfazowej. Z biegiem lat zostały opracowane różne metody wyznaczania liczby półek teoretycznych. Mimo tak sporej ilości metod wszystkie łączy identyczna zasada działania polegająca na określeniu składu jednej z faz pomiędzy półkami. Przyjęto ogólną nazwę dla tych metod „z półki na półkę".

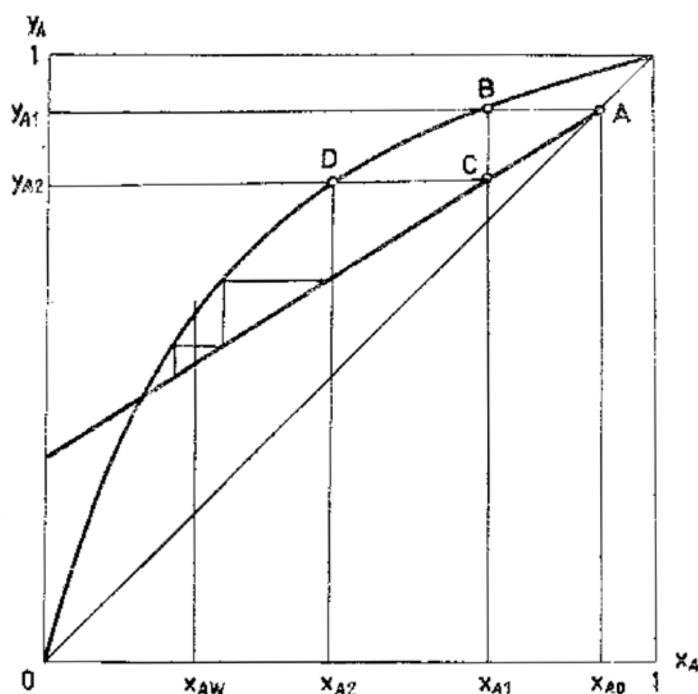
Do najbardziej znanych metod obliczania półek teoretycznych dla rektyfikacji dwuskładnikowej należą [1,2]:

- metoda graficzna McCabe'a – Thielego,
- metoda rachunkowa Sorela (bilansów cieplnych),
- metoda graficzna termodynamiczna Ponchona i Savarita,
- metoda graficzna Gillilanda (powrótu),
- metody matematyczne.

W dalej części pracy części pracy szerzej omówiono metodę graficzną McCabe'a – Thielego, ponieważ zastosuję ją do obliczeń projektowych.

2.4.1 Metoda graficzna McCabe'a – Thielego

Metoda ta polega na wykreśleniu krzywej równowagi oraz linii operacyjnej dla rozpatrywanego układu. Pomiędzy tymi wykresami stosuje się tak zwaną konstrukcję schodkową. Została opracowana przez dwóch amerykańskich doktorantów McCaba'a i Thielego. Jest to metoda graficzna. Wykorzystuje się w niej tak zwany kwadrat jednostkowy, a jej podstawą jest bilans materiałowy danego procesu. Na osi x, znajduje się skład cieczy (w ułamkach molowych), natomiast na osi y, skład pary [5].



Rys. 2.13. Wyznaczenie liczby półek teoretycznych metodą McCabe'a–Thieliego w kolumnie rektyfikacyjnej [8]

Na rysunku 2.13, przedstawiono przykładową konstrukcję dla mieszaniny dwuskładnikowej. W punkcie A para, która opuszcza pierwszą półkę (najwyższą) posiada takie samo stężenie składnika *A* co orosienie na tej półce, $y_{A1} = x_{AD}$. Z pierwszej półki ciecz, która spływa ma stężenie x_{A1} i jest w stanie równowagi z parą o stężeniu $y_{A1} = y^*_{A1}$, która opuszcza pierwszą półkę. Aby dowiedzieć się jakiej wartości odpowiada x_{A1} trzeba wykreślić poziomą linię z punktu A do punktu przecięcia się z linią równowagi – tak powstaje punkt B. Poniżej dochodzi do kontaktu z cieczą, która spływa z pierwszej półki z parami odchodzącymi z drugiej półki. Linia operacyjna pokazuje związek pomiędzy stężeniami cieczy i pary. To na niej odnajduje się stężenie pary, która opuszcza drugą półkę y_{A2}. Wyznaczone stężenie dla pary jest również w stanie równowagowym z cieczą, która spływa również z tej samej półki, czyli analogicznie stężenie x_{A2} otrzymuje się na linii równowagi (punkt D). Takie schodkowanie prowadzi się aż do wyznaczenia x_{AW}.

Liczba narysowanych tak schodków odpowiada liczbie półek teoretycznych. Należy jednak pamiętać, ze w tej metodzie ostatnia półka teoretyczna oznacza wyparkę (kocioł), a więc liczbę półek oszacowaną metodą graficzną z wykresu należy pomniejszyć o jeden [5,8].

III. CEL I ZAKRES PRACY

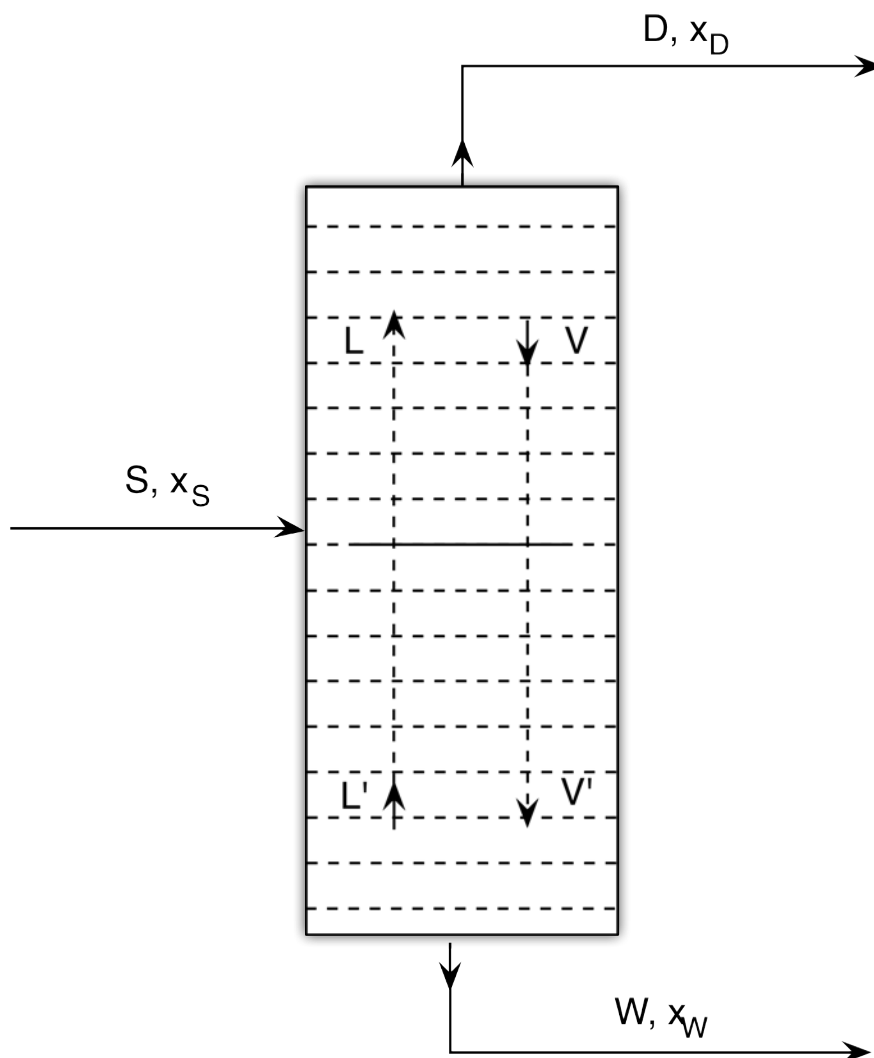
Celem tej pracy inżynierskiej jest zaprojektowanie kolumny rektyfikacyjnej do rozdzielania mieszaniny dwuskładnikowej benzen–toluen. Założenia projektowe zostały sformułowane na podstawie literatury [1], które zostały przedstawione w części koncepcyjnej. Zostały dobrane wszystkie niezbędne wzory do obliczeń różnych wariantów, w których zmianie ulegają:

wariant I – parametr stopnia suchości q, obliczenia dla 0,6 oraz 1,

wariant II – strumień udziału molowego składnika A w destylacie, z wartości 0,80 na 0,95 kmolA/kmol.

IV. CZĘŚĆ KONCEPRYJNA

4.1. Schemat procesu rektyfikacji



Rys. 4.1. Schemat procesu rektyfikacji w kolumnie rektyfikacyjnej, S – strumień doprowadzanej surówki, x_S – udział molowy składnika A w surówce, D – strumień odbieranego destylatu, x_D – udział molowy składnika A w destylacie, W – strumień cieczy wyczerpanej, , x_W – udział molowy składnika A w cieczy wyczerpanej (opracowanie własne)

W celu wykonania obliczeń projektowych do zaprojektowania kolumny rektyfikacyjnej zdefiniowano następujące zadanie.

W kolumnie rektyfikacyjnej o działaniu ciągłym należy rozdzielić 55 kmol/h mieszaniny: benzen (A) - toluen (B). Zawartość składnika bardziej lotnego w surówce wynosi 0,45 kmolA/kmol. Przed wprowadzeniem do kolumny surówkę podgrzewa się, otrzymując parę mokrą o stopniu suchości 0,6. W wyniku rektyfikacji otrzymano destylat o zawartości składnika bardziej lotnego 0,80 kmolA/kmol oraz ciecz wyczerpaną o udziale molowym składnika B: 0,95 kmolB/kmol. Ze skraplacza zawraca się do kolumny 60 kmol/h cieczy. Należy znaleźć wartość strumienia destylatu i cieczy wyczerpanej oraz podać równania linii operacyjnych: górnej i dolnej oraz wyznaczyć liczbę półek teoretycznych. W pracy obliczenia wykonuję dla różnych wartości q (stopnia suchości) równych 0,6 i 1.

Obliczenia dla kolumny rektyfikacyjnej

Założenia:

- α - współczynnik lotności względnej z literatury – wartość tablicowa [3] $\alpha = 2,45$
- sprawność ogólna E_k=0,72 dla współczynnika nadmiaru orosienia z = 1,5.

Dane projektowe zestawiono w Tabeli 2.

	Wariant I		Wariant II
q	0,6	1	1
x_D	0,80 $\left[\frac{kmolA}{kmol}\right]$		0,95 $\left[\frac{kmolA}{kmol}\right]$
x_S	0,45 $\left[\frac{kmolA}{kmol}\right]$		0,45 $\left[\frac{kmolA}{kmol}\right]$
S	55 $\left[\frac{kmol}{h}\right]$		55 $\left[\frac{kmol}{h}\right]$
x_W	0,5 $\left[\frac{kmolA}{kmol}\right]$		0,5 $\left[\frac{kmolA}{kmol}\right]$
L	60 $\left[\frac{kmol}{h}\right]$		60 $\left[\frac{kmol}{h}\right]$
α	2,45 [–]		2,45 [–]
z	1,5 [–]		1,5 [–]

Tabela 2. Dane z treści zadania projektowego

V. CZĘŚĆ PROJEKTOWA

Obliczenia dla kolumny rektyfikacyjnej

Dane	Obliczenia	Wyniki
$S=55\frac{kmol}{h}$ $x_W=0{,}05\frac{kmolA}{kmol}$ $x_D=0{,}80\frac{kmolA}{kmol}$ $x_S=0{,}45\frac{kmolA}{kmol}$	**5. BILANS MASOWY.** *5.1. Strumień odprowadzonego destylatu.* $S=D+W$ $S\cdot x_S=D\cdot x_D+W\cdot x_W$ $55=D+W$ $55\cdot 0{,}45=D\cdot 0{,}80+W\cdot 0{,}05$ $W=55-D$ $24{,}75=D\cdot 0{,}80+(55-D)\cdot 0{,}05$ $24{,}75=D\cdot 0{,}80+2{,}75-D\cdot 0{,}05$ $24{,}75-2{,}75=D\cdot 0{,}80-D\cdot 0{,}05$ $22=0{,}75D$ $0{,}75D=22/\div 0{,}75$ $D=29{,}33\frac{kmol}{h}$	$D=29{,}33\frac{kmol}{h}$
$D=29{,}33\frac{kmol}{h}$	*5.2. Strumień cieczy wyczerpanej.* $W=55-D$ $W=55-29{,}33$ $W=25{,}67\frac{kmol}{h}$ lub z innego wzoru: $W=S\left(\frac{x_D-x_S}{x_D-x_W}\right)$ $W=55\cdot\left(\frac{0{,}80-0{,}45}{0{,}80-0{,}05}\right)$ $W=25{,}76\frac{kmol}{h}$	$W=25{,}76\frac{kmol}{h}$

$\alpha = 2,45$	**5.3. WYZNACZANIE LINII RÓWNOWAGI.** $y_R^* = \frac{\alpha \cdot x_R}{1 + (\alpha - 1) \cdot x_R}$ $y_R^* = \frac{2,45 \cdot x_R}{1 + (2,45 - 1) \cdot x_R} = \frac{2,45 x_R}{1 + 2,45 x_R}$ $y_R^* = \frac{2,45 x_R}{1 + 2,45 x_R}$	
$x_D = 0,80 \frac{kmolA}{kmol}$ $x_S = 0,45 \frac{kmolA}{kmol}$	$x_R = x_S = 0,45 \frac{kmolA}{kmol}$ $y_R^* = \frac{2,45 x_R}{1 + 1,45 x_R} = \frac{2,45 \cdot 0,45}{1 + 1,45 \cdot 0,45} = \frac{1,10}{1,65} = 0,67$ $y_R^* = 0,67$	$y_R^* = 0,67$
$L = 60 \frac{kmol}{h}$ $D = 29,33 \frac{kmol}{h}$	**5.4. STOPIEŃ OROSIENIA W GÓRNEJ CZĘŚCI KOLUMNY.** $\Psi = \frac{L}{D}$ $\Psi = \frac{60}{29,33}$ $\Psi = 2,046$	$\Psi = 2,046$
$z = 1,5$ $\Psi = 2,046$ $D = 29,33 \frac{kmol}{h}$	*5.4.1. Strumień zawracanej cieczy w górnej części kolumny rektyfikacyjnej. W treści projektu już jest wartość strumienia podana* $L = 60 kmol / h$ *-można wyliczyć, czy się wyniki zgadzają.* $\Psi = \frac{L}{D}$ $L = \Psi \cdot D$ $L = 2,046 \cdot 29,33 = 60.009$ $L = 60 \frac{kmol}{h}$	$L = 60 \frac{kmol}{h}$

$\Psi = 2{,}046$ $z = 1{,}5$	**5.5. MINIMALNY STOPIEŃ OROSIENIA W GÓRNEJ CZĘŚCI KOLUMNY.** $\Psi = z \cdot \Psi_{min}$ $\Psi_{min} = \frac{\Psi}{z}$ $\Psi_{min} = \frac{2{,}046}{1{,}5} = 1{,}364$	$\Psi_{min} = 1{,}364$
$x_D = 0{,}80 \frac{kmolA}{kmol}$ $\Psi = 2{,}046$	**5.6. RÓWNANIE GÓRNEJ LINII OPERACYJNEJ.** $y = \frac{\Psi}{\Psi + 1} \cdot x + \frac{x_D}{\Psi + 1}$ $y = \frac{2{,}046}{2{,}046 + 1} \cdot x + \frac{0{,}80}{2{,}046 + 1}$ GLO $y = 0{,}67x + 0{,}26$	GLO $y = 0{,}67x + 0{,}26$
	W DALSZEJ PRACY ZOSTANĄ PRZEDSTAWIONE OBLICZENIA DLA q=0,6 **5.7. RÓWNANIE DOLNEJ LINII OPERACYJNEJ.** $y = \frac{\Psi'}{\Psi' - 1} \cdot x - \frac{x_w}{\Psi' - 1}$ *5.7.1 Strumień pary w górnej części kolumny rektyfikacyjnej.*	
$D = 29{,}33 \frac{kmol}{h}$ $L = 60 \frac{kmol}{h}$	$V = L + D$ $V = 60 + 29{,}33 = 89{,}33$ $V = 89{,}33 \frac{kmol}{h}$	$V = 89{,}33 \frac{kmol}{h}$

$L = 60\frac{kmol}{h}$ $S = 55\frac{kmol}{h}$ $q = 0.6$	*5.7.2 Strumień zawracany w dolnej części kolumny rektyfikacyjnej.* $$L' = L + q \cdot S$$ $L' = 60 + 0,6 \cdot 55 = 93$ $L' = 93\frac{kmol}{h}$	$L' = 93\frac{kmol}{h}$
$q = 0.6$ $S = 55\frac{kmol}{h}$ $V = 89,33\frac{kmol}{h}$	*5.7.3 Strumień pary w dolnej części kolumny rektyfikacyjnej.* $$V' = V + (q-1) \cdot S$$ $V' = 89,33 + (0.6-1) \cdot 55 = 67,33$ $V' = 67,33\frac{kmol}{h}$	$V' = 67,33\frac{kmol}{h}$
$W = 25,76\frac{kmol}{h}$ $L' = 93\frac{kmol}{h}$	*5.7.4 Równanie dolnej linii operacyjnej.* $$\Psi' = \frac{L'}{W}$$ $\Psi' = \frac{93}{25,67} = 3,62$ $\Psi' = 3,62$ $y = \frac{\Psi'}{\Psi'-1} \cdot x - \frac{x_w}{\Psi'-1}$ $y = \frac{3,62}{3,62-1} \cdot x - \frac{0,05}{3,62-1}$ DLO $y = 1,38x - 0,02$	$\Psi' = 3,62$ **DLO** $y = 1,38x - 0,02$

$y_1 = 0,80$ $x_W = 0,05\frac{kmolA}{kmol}$ $x_D = 0,80\frac{kmolA}{kmol}$ $x_S = 0,45\frac{kmolA}{kmol}$ $x_1 = 0,62 > x_S$ $y_2 = 0,68$	**5.8. OBLICZANIE LICZBY PÓŁEK W KOLUMNIE REKTYFIKACYJNEJ W CZĘŚCI GÓRNEJ.** *5.8.1 Obliczanie teoretycznej liczby półek w kolumnie w części górnej.* **I półka:** $x_D = y_1 = 0,80$ $y_1 = \frac{2,45x_1}{1+1,45x_1} \Rightarrow x_1$ $x_1 = \frac{y_1}{2,45-1,45y_1}$ $x_1 = \frac{0,80}{2,45-1,45\cdot 0,80} = 0,62$ $y_1 = 0,80$ $x_1 = 0,62 > x_S$ **II półka:** $y_2 = 0,67x_1 + 0,26$ $y_2 = 0,67\cdot 0,62 + 0,26 = 0,68$ $x_2 = \frac{y_2}{2,45-1,45y_2}$ $x_2 = \frac{0,68}{2,45-1,45\cdot 0,68} = 0,46$ $y_2 = 0,68$ $x_2 = 0,46 > x_S$	$y_1 = 0,80$ $x_1 = 0,62 > x_S$ $y_2 = 0,68$ $x_2 = 0,46 > x_S$

$x_2 = 0{,}46 > x_S$ $y_3 = 0{,}57$	**III półka:** $y_3 = 0{,}67 x_2 + 0{,}26$ $y_3 = 0{,}67 \cdot 0{,}46 + 0{,}26 = 0{,}57$ $x_3 = \dfrac{y_3}{2{,}45 - 1{,}45 y_3}$ $x_3 = \dfrac{0{,}57}{2{,}45 - 1{,}45 \cdot 0{,}57} = 0{,}35$ $y_3 = 0{,}57$ $x_3 = 0{,}35 < x_S$ Całkowita liczba półek teoretycznych w górnej części kolumny rektyfikacyjnej wynosi: $N_{tg} = 3$	$y_3 = 0{,}57$ $x_3 = 0{,}35 < x_S$ $N_{tg} = 3$
$x_3 = 0{,}35$ $y_4 = 0{,}46$	*5.8.2 Obliczanie teoretycznej liczby półek w kolumnie w części dolnej.* **IV półka** $y_4 = 1{,}38 x_3 - 0{,}02$ $y_4 = 1{,}38 \cdot 0{,}35 - 0{,}02 = 0{,}46$ $x_4 = \dfrac{y_4}{2{,}45 - 1{,}45 y_4}$ $x_4 = \dfrac{0{,}46}{2{,}45 - 1{,}45 \cdot 0{,}46} = 0{,}26$ $y_4 = 0{,}46$ $x_4 = 0{,}26 > x_W$	$y_4 = 0{,}46$ $x_4 = 0{,}26 > x_W$

$x_4 = 0,26 > x_W$ $y_5 = 0,34$	**V półka** $y_5 = 1,38x_4 - 0,02$ $y_5 = 1,38 \cdot 0,26 - 0,02 = 0,34$ $x_5 = \frac{y_5}{2,45 - 1,45y_5}$ $x_5 = \frac{0,34}{2,45 - 1,45 \cdot 0,34} = 0,17$ $y_5 = 0,34$ $x_5 = 0,17 > x_W$	$y_5 = 0,34$ $x_5 = 0,17 > x_W$
$x_5 = 0,17 > x_W$ $y_6 = 0,21$	**VI półka** $y_6 = 1,38x_5 - 0,02$ $y_6 = 1,38 \cdot 0,17 - 0,02 = 0,21$ $x_6 = \frac{y_6}{2,45 - 1,45y_6}$ $x_6 = \frac{0,21}{2,45 - 1,45 \cdot 0,21} = 0,1$ $y_6 = 0,21$ $x_6 = 0,1 > x_W$	$y_6 = 0,21$ $x_6 = 0,1 > x_W$
$x_6 = 0,1 > x_W$ $y_7 = 0,118$	**VII półka** $y_7 = 1,38x_6 - 0,02$ $y_7 = 1,38 \cdot 0,1 - 0,02 = 0,12$ $x_7 = \frac{y_7}{2,45 - 1,45y_7}$ $x_7 = \frac{0,118}{2,45 - 1,45 \cdot 0,118} = 0,052$ $y_7 = 0,118$ $x_7 = 0,052 > x_W$	$y_7 = 0,118$ $x_7 = 0,052 > x_W$

$x_7 = 0{,}052 > x_W$ $y_8 = 0{,}05$	**VIII półka** $y_8 = 1{,}38x_7 - 0{,}02$ $y_8 = 1{,}38 \cdot 0{,}052 - 0{,}02 = 0{,}05$ $x_8 = \frac{y_8}{2{,}45 - 1{,}45y_8}$ $x_8 = \frac{0{,}05}{2{,}45 - 1{,}45 \cdot 0{,}05} = 0{,}02$ $y_8 = 0{,}05$ $x_8 = 0{,}02 > x_W$	$y_8 = 0{,}05$ $x_8 = 0{,}02 > x_W$
	Teoretyczna liczba półek w dolnej części kolumny rektyfikacyjnej wynosi $N_{td} = 5 - 1 = 4$ $N_{td} = 4$	$N_{td} = 4$
$N_{td} = 4$ $N_{tg} = 3$	*5.8.3 Obliczanie całkowitej liczby półek teoretycznych w kolumnie w części dolnej.* $N_t = N_{td} + N_{tg}$ $N_t = 4 + 3$ $N_t = 7$	$N_t = 7$
$q = 0.6$ $N_t = 7$ E_k=0,72	*5.8.4 Obliczanie rzeczywistej liczby półek w kolumnie w części dolnej* $N_{rz} = \frac{N_t}{E_k}$ $N_{rz} = \frac{7}{0{,}72} = 9{,}72$ $N_{rz} = 10$	$N_{rz} = 10$

W DALSZEJ PRACY ZOSTANĄ PRZEDSTAWIONE OBLICZENIA DLA q=1

Dane	Obliczenia	Wyniki
	5.9 RÓWNANIE DOLNEJ LINII OPERACYJNEJ.	
	$y = \frac{\Psi'}{\Psi'-1} \cdot x - \frac{x_w}{\Psi'-1}$	
$L = 60\frac{kmol}{h}$ $D = 29,33\frac{kmol}{h}$	*5.9.1 Strumień pary w górnej części kolumny rektyfikacyjnej.* $V = L + D$ $V = 60 + 29,33 = 89,33$ $V = 89,33\frac{kmol}{h}$	$V = 89,33\frac{kmol}{h}$
$L = 60\frac{kmol}{h}$ $S = 55\frac{kmol}{h}$ $q = 1$	*5.9.2 Strumień zawracany w dolnej części kolumny rektyfikacyjnej.* $L' = L + q \cdot S$ $L' = 60 + 1 \cdot 55 = 115$ $L' = 115\frac{kmol}{h}$	$L' = 115\frac{kmol}{h}$
$S = 55\frac{kmol}{h}$ $V = 89,33\frac{kmol}{h}$ $q = 1$	*5.9..3 Strumień pary w dolnej części kolumny rektyfikacyjnej.* $V' = V + (q-1) \cdot S$ $V' = 89,33 + (1-1) \cdot 55 = 89,33$ $V' = 89,33\frac{kmol}{h}$	$V' = 89,33\frac{kmol}{h}$

	5.9.4 Równanie dolnej linii operacyjnej.	
$W = 25,76 \frac{kmol}{h}$ $L' = 93 \frac{kmol}{h}$	$$\Psi' = \frac{L'}{W}$$ $\Psi' = \frac{115}{25,67} = 4,48$ $\Psi' = 4,48$ $y = \frac{\Psi'}{\Psi' - 1} \cdot x - \frac{x_w}{\Psi' - 1}$ $y = \frac{4,48}{4,48 - 1} \cdot x - \frac{0,05}{4,48 - 1}$ DLO $y = 1,29x - 0,01$	$\Psi' = 4,48$ **DLO** $y = 1,29x - 0,01$
	5.10. OBLICZANIE LICZBY PÓŁEK W KOLUMNIE REKTYFIKACYJNEJ W CZĘŚCI DOLNEJ I GÓRNEJ.	
	5.10.1 Obliczanie teoretycznej liczby półek w kolumnie w części górnej.	
$y_1 = 0,80$ $x_W = 0,05 \frac{kmolA}{kmol}$ $x_D = 0,80 \frac{kmolA}{kmol}$ $x_S = 0,45 \frac{kmolA}{kmol}$	**I półka:** $x_D = y_1 = 0,80$ $y_1 = \frac{2,45x_1}{1 + 1,45x_1} \Rightarrow x_1$ $x_1 = \frac{y_1}{2,45 - 1,45y_1}$ $x_1 = \frac{0,80}{2,45 - 1,45 \cdot 0,80} = 0,62$ $y_1 = 0,80$ $x_1 = 0,62 > x_S$	$y_1 = 0,80$ $x_1 = 0,62 > x_S$

$x_1 = 0,62 > x_S$ $y_2 = 0,68$	**II półka:** $y_2 = 0,67x_1 + 0,26$ $y_2 = 0,67 \cdot 0,62 + 0,26 = 0,68$ $x_2 = \frac{y_2}{2,45 - 1,45y_2}$ $x_2 = \frac{0,68}{2,45 - 1,45 \cdot 0,68} = 0,46$ $y_2 = 0,68$ $x_2 = 0,46 > x_S$	$y_2 = 0,68$ $x_2 = 0,46 > x_S$
$y_2 = 0,68$ $y_3 = 0,57$	**III półka:** $y_3 = 0,67x_2 + 0,26$ $y_3 = 0,67 \cdot 0,46 + 0,26 = 0,57$ $x_3 = \frac{y_3}{2,45 - 1,45y_3}$ $x_3 = \frac{0,57}{2,45 - 1,45 \cdot 0,57} = 0,35$ $y_3 = 0,57$ $x_3 = 0,35 < x_S$	$y_3 = 0,57$ $x_3 = 0,35 < x_S$
	Całkowita liczba półek teoretycznych w górnej części kolumny rektyfikacyjnej wynosi: $N_{tg} = 3$	$N_{tg} = 3$
	5.10.2 Obliczanie teoretycznej liczby półek w kolumnie w części dolnej.	
$y_3 = 0,57$	**IV półka** $y_4 = 1,29x_3 - 0,01$ $y_4 = 1,29 \cdot 0,35 - 0,01 = 0,44$	

$y_4 = 0,44$	$x_4 = \frac{y_4}{2,45 - 1,45 y_4}$ $x_4 = \frac{0,44}{2,45 - 1,45 \cdot 0,44} = 0,24$ $y_4 = 0,44$ $x_4 = 0,24 > x_W$	$y_4 = 0,44$ $x_4 = 0,24 > x_W$
$x_4 = 0,24 > x_W$ $y_5 = 0,30$	**V półka** $y_5 = 1,29 x_4 - 0,01$ $y_5 = 1,29 \cdot 0,24 - 0,01 = 0,30$ $x_5 = \frac{y_5}{2,45 - 1,45 y_5}$ $x_5 = \frac{0,30}{2,45 - 1,45 \cdot 0,30} = 0,15$ $y_5 = 0,30$ $x_5 = 0,15 > x_W$	$y_5 = 0,30$ $x_5 = 0,15 > x_W$
$x_5 = 0,15 > x_W$ $y_6 = 0,18$	**VI półka** $y_6 = 1,29 x_5 - 0,01$ $y_6 = 1,29 \cdot 0,15 - 0,01 = 0,18$ $x_6 = \frac{y_6}{2,45 - 1,45 y_6}$ $x_6 = \frac{0,18}{2,45 - 1,45 \cdot 0,18} = 0,08$ $y_6 = 0,18$ $x_6 = 0,08 > x_W$	$y_6 = 0,18$ $x_6 = 0,08 > x_W$
$x_6 = 0,08 > x_W$ $y_7 = 0,09$	**VII półka** $y_7 = 1,29 x_6 - 0,01$ $y_7 = 1,29 \cdot 0,08 - 0,01 = 0,09$ $x_7 = \frac{y_7}{2,45 - 1,45 y_7}$ $x_7 = \frac{0,09}{2,45 - 1,45 \cdot 0,09} = 0,04$ $y_7 = 0,09$ $x_7 = 0,04 < x_W$	$y_7 = 0,09$ $x_7 = 0,04 < x_W$

$q=1$ $N_t=6$ E_k=0,72	Teoretyczna liczba półek w dolnej części kolumny rektyfikacyjnej wynosi $N_{td}=4-1=3$ $N_{td}=3$ *5.10.3 Obliczanie całkowitej liczby półek <u>teoretycznych</u> w kolumnie w części dolnej.* $N_t=N_{td}+N_{tg}$ $N_t=3+3$ $N_t=6$ *5.10.4 Obliczanie <u>rzeczywistej</u> liczby półek w kolumnie w części dolnej* $N_{rz}=\frac{N_t}{E_k}$ $N_{rz}=\frac{6}{0,72}=8,33$ $N_{rz}=9$	$N_{td}=3$ $N_t=6$ $N_{rz}=9$

W DALSZEJ PRACY ZOSTANĄ PRZEDSTAWIONE OBLICZENIA DLA q=1, x_D=0,95 [kmolA/kmol]

Dane	Obliczenia	Wyniki
	5.11. BILANS MASOWY.	
	5.11.1. Strumień odprowadzonego destylatu.	
$S = 55\frac{kmol}{h}$ $x_W = 0{,}05\frac{kmolA}{kmol}$ $x_D = 0{,}95\frac{kmolA}{kmol}$ $x_S = 0{,}45\frac{kmolA}{kmol}$ *q=1*	$S = D + W$ $S \cdot x_S = D \cdot x_D + W \cdot x_W$ $D = \left(\frac{x_S - x_W}{x_D - x_W}\right) \cdot S$ $D = \left(\frac{0{,}45 - 0{,}05}{0{,}95 - 0{,}05}\right) \cdot 55$ $D = 24{,}4\frac{kmol}{h}$	$D = 24{,}4\frac{kmol}{h}$
	5.11.2. Strumień cieczy wyczerpanej.	
	$W = S\left(\frac{x_D - x_S}{x_D - x_W}\right)$ $W = 55 \cdot \left(\frac{0{,}95 - 0{,}45}{0{,}95 - 0{,}05}\right)$ $W = 30{,}56\frac{kmol}{h}$	$W = 30{,}56\frac{kmol}{h}$
$D = 24{,}4\frac{kmol}{h}$	**5.12. WYZNACZANIE LINII RÓWNOWAGI.**	
$\alpha = 2{,}45$	$y_R^* = \frac{\alpha \cdot x_R}{1 + (\alpha - 1) \cdot x_R}$ $y_R^* = \frac{2{,}45 \cdot x_R}{1 + (2{,}45 - 1) \cdot x_R} = \frac{2{,}45x_R}{1 + 2{,}45x_R}$ $y_R^* = \frac{2{,}45x_R}{1 + 2{,}45x_R}$	$y_R^* = \frac{2{,}45x_R}{1 + 2{,}45x_R}$
$x_D = 0{,}95\frac{kmolA}{kmol}$ $x_S = 0{,}45\frac{kmolA}{kmol}$	$x_R = x_S = 0{,}45\frac{kmolA}{kmol}$ $y_R^* = \frac{2{,}45x_R}{1 + 1{,}45x_R} = \frac{2{,}45 \cdot 0{,}45}{1 + 1{,}45 \cdot 0{,}45} = \frac{1{,}10}{1{,}65} = 0{,}67$ $y_R^* = 0{,}67$	$y_R^* = 0{,}67$

	5.13. STOPIEŃ OROSIENIA W GÓRNEJ CZĘŚCI KOLUMNY.	
$L = 60\frac{kmol}{h}$ $D = 24,4\frac{kmol}{h}$	$\Psi = \frac{L}{D}$ $\Psi = \frac{60}{24,4}$ $\Psi = 2,46$	$\Psi = 2,46$
	5.14. MINIMALNY STOPIEŃ OROSIENIA W GÓRNEJ CZĘŚCI KOLUMNY.	
$z = 1,5$ $\Psi = 2,46$	$\Psi = z \cdot \Psi_{min}$ $\Psi_{min} = \frac{\Psi}{z}$ $\Psi_{min} = \frac{2,46}{1,5} = 1,64$	$\Psi_{min} = 1,64$
	5.15. RÓWNANIE GÓRNEJ LINII OPERACYJNEJ.	
$\Psi_{min} = 1,64$	$y = \frac{\Psi}{\Psi + 1} \cdot x + \frac{x_D}{\Psi + 1}$ $y = \frac{2,46}{2,46 + 1} \cdot x + \frac{0,95}{2,46 + 1}$ GLO $y = 0,71x + 0,27$	GLO $y = 0,71x + 0,27$
	5.16. RÓWNANIE DOLNEJ LINII OPERACYJNEJ. $y = \frac{\Psi'}{\Psi' - 1} \cdot x - \frac{x_w}{\Psi' - 1}$ *5.16.1. Strumień pary w górnej części kolumny rektyfikacyjnej.*	
$D = 58,67\frac{kmol}{h}$ $L = 60\frac{kmol}{h}$	$V = L + D$ $V = 60 + 24,4 = 84,4$	

$x_D = 0,80 \frac{kmolA}{kmol}$ $D = 58,67 \frac{kmol}{h}$ $L = 60 \frac{kmol}{h}$ $\Psi = 2,46$ *q=1* $V = 84,4 \frac{kmol}{h}$	$V = 84,4 \frac{kmol}{h}$ *5.16.2 Strumień zawracany w dolnej części kolumny rektyfikacyjnej.* $L' = L + q \cdot S$ $L' = 60 + 1 \cdot 55 = 115$ $L' = 115 \frac{kmol}{h}$ *5.16.3 Strumień pary w dolnej części kolumny rektyfikacyjnej.* $V' = V + (q-1) \cdot S$ $V' = 84,4 + (1-1) \cdot 55 = 84,4$ $V' = 84,4 \frac{kmol}{h}$	$V = 84,4 \frac{kmol}{h}$ $L' = 115 \frac{kmol}{h}$ $V' = 84,4 \frac{kmol}{h}$
$L = 60 \frac{kmol}{h}$ $L' = 115 \frac{kmol}{h}$ $\Psi' = 3,76$ $V = 118,67 \frac{kmol}{h}$ $W = 30,56 \frac{kmol}{h}$ $D = 58,67 \frac{kmol}{h}$	*5.16.4 Równanie dolnej linii operacyjnej.* $\Psi' = \frac{L'}{W}$ $\Psi' = \frac{115}{30,56} = 3,76$ $\Psi' = 3,76$ $y = \frac{\Psi'}{\Psi' - 1} \cdot x - \frac{x_w}{\Psi' - 1}$ $y = \frac{3,76}{3,76 - 1} \cdot x - \frac{0,05}{3,76 - 1}$ DLO $y = 1,36x - 0,02$ **5.17. OBLICZANIE LICZBY PÓŁEK W KOLUMNIE REKTYFIKACYJNEJ W CZĘŚCI GÓRNEJ.** *5.17.1 Obliczanie teoretycznej liczby półek w kolumnie w części górnej.* **I półka:** $x_D = y_1 = 0,95$	$\Psi' = 3,76$ DLO $y = 1,36x - 0,02$

$x_D = y_1 = 0{,}95$ $x_W = 0{,}05\frac{kmolA}{kmol}$ $x_1 = 0{,}89 > x_S$ $y_2 = 0{,}9$ $x_2 = 0{,}79 > x_S$ $y_3 = 0{,}83$ $y_1 = 0{,}95$ $x_S = 0{,}45\frac{kmolA}{kmol}$ $x_D = 0{,}80\frac{kmolA}{kmol}$	$y_1 = \frac{2{,}45x_1}{1+1{,}45x_1} \Rightarrow x_1$ $x_1 = \frac{y_1}{2{,}45-1{,}45y_1}$ $x_1 = \frac{0{,}95}{2{,}45-1{,}45\cdot 0{,}95} = 0{,}89$ $y_1 = 0{,}95$ $x_1 = 0{,}89 > x_S$ **II półka:** $y_2 = 0{,}71x_1 + 0{,}27$ $y_2 = 0{,}71\cdot 0{,}89 + 0{,}4 = 0{,}9$ $x_2 = \frac{y_2}{2{,}45-1{,}45y_2}$ $x_2 = \frac{0{,}9}{2{,}45-1{,}45\cdot 0{,}9} = 0{,}79$ $y_2 = 0{,}9$ $x_2 = 0{,}79 > x_S$ **III półka:** $y_3 = 0{,}71x_2 + 0{,}27$ $y_3 = 0{,}71\cdot 0{,}79 + 0{,}27 = 0{,}83$ $x_3 = \frac{y_3}{2{,}45-1{,}45y_3}$ $x_3 = \frac{0{,}83}{2{,}45-1{,}45\cdot 0{,}83} = 0{,}67$ $y_3 = 0{,}83$ $x_3 = 0{,}67 < x_S$ *Obliczając analogicznie otrzymujemy;* **IV półka:** $y_4 = 0{,}75$ $x_4 = 0{,}55 < x_S$ **V półka:** $y_5 = 0{,}66$ $x_5 = 0{,}44 > x_S$	$y_1 = 0{,}95$ $x_1 = 0{,}89 > x_S$ $y_2 = 0{,}9$ $x_2 = 0{,}79 > x_S$ $y_3 = 0{,}83$ $x_3 = 0{,}67 < x_S$ $y_4 = 0{,}75$ $x_4 = 0{,}55 < x_S$ $y_5 = 0{,}66$ $x_5 = 0{,}44 > x_S$

	Całkowita liczba półek teoretycznych w górnej części kolumny rektyfikacyjnej wynosi: $N_{tg} = 5$	$N_{tg} = 5$
	5.17.2 Obliczanie teoretycznej liczby półek w kolumnie w części dolnej. **VI półka:** $y_6 = 1{,}36x_5 - 0{,}02$ $y_6 = 1{,}8 \cdot 0{,}43 - 0{,}04 = 0{,}58$ $x_6 = \dfrac{y_6}{2{,}45 - 1{,}45y_6}$ $x_6 = \dfrac{0{,}58}{2{,}45 - 1{,}45 \cdot 0{,}58} = 0{,}36$ $y_6 = 0{,}58$ $x_6 = 0{,}36 < x_W$	$y_6 = 0{,}58$ $x_6 = 0{,}36 < x_W$
	<u>*Dla kolejnych półek otrzymano następujące wyniki:*</u>	
	VII półka: $y_7 = 0{,}47$ $x_7 = 0{,}27 < x_W$	$y_7 = 0{,}47$ $x_7 = 0{,}27 < x_W$
$x_W = 0{,}05 \dfrac{kmolA}{kmol}$	**VIII półka:** $y_8 = 0{,}35$ $x_8 = 0{,}18 < x_W$	$y_8 = 0{,}35$ $x_8 = 0{,}18 < x_W$
	IX półka: $y_9 = 0{,}22$ $x_9 = 0{,}1 < x_W$	$y_9 = 0{,}22$ $x_9 = 0{,}1 < x_W$
	X półka: $y_{10} = 0{,}116$ $x_{10} = 0{,}051 < x_W$	$y_{10} = 0{,}116$ $x_{10} = 0{,}051 < x_W$

$E_k = 0,72$ $N_t = 11$	**XI półka:** $y_{11} = 0,05$ $x_{11} = 0,02 > x_W$ Całkowita liczba półek teoretycznych w dolnej części kolumny rektyfikacyjnej wynosi: $N_{td} = 6 - 1$ $N_{td} = 5$ *5.17.3 Obliczanie całkowitej liczby półek teoretycznych w kolumnie w części dolnej.* $N_t = N_{td} + N_{tg}$ $N_t = 5 + 5$ $N_t = 10$ *5.17.4 Obliczanie rzeczywistej liczby półek w kolumnie w części dolnej* $N_{rz} = \frac{N_t}{E_k}$ $N_{rz} = \frac{10}{0,72} = 13,88$ $N_{rz} = 14$	$y_{11} = 0,05$ $x_{11} = 0,02 > x_W$ $N_{td} = 5$ $N_t = 10$ $N_{rz} = 14$

Z przeprowadzonych obliczeń dla obu wariantów otrzymano różne wartości liczby półek rzeczywistych.

I wariant, $x_D = 0,80 \frac{kmolA}{kmol}$, gdy *q=0,6* to liczba półek rzeczywistych równa jest **10**, a przy q=1 wynosi **9**.

II wariant, $x_D = 0,95 \frac{kmolA}{kmol}$ przy *q=1*, liczba półek rzeczywistych równa jest **14**.

5.18. Obliczenia liczby półek metodą Fensky'ego

To samo zadanie projektowe obliczono przy zastosowaniu metody Fensky'ego

$$n_{t,\min} = \frac{\ln\left[\dfrac{x_D(1-x_w)}{x_w(1-x_D)}\right]}{\ln\alpha} - 1$$

Dla wariantu I, (q=1):

$$n_{t,\min} = \frac{\ln\left[\dfrac{0,80(1-0,05)}{0,05(1-0,80)}\right]}{\ln 2,45} - 1 = 3,8 \cong 4$$

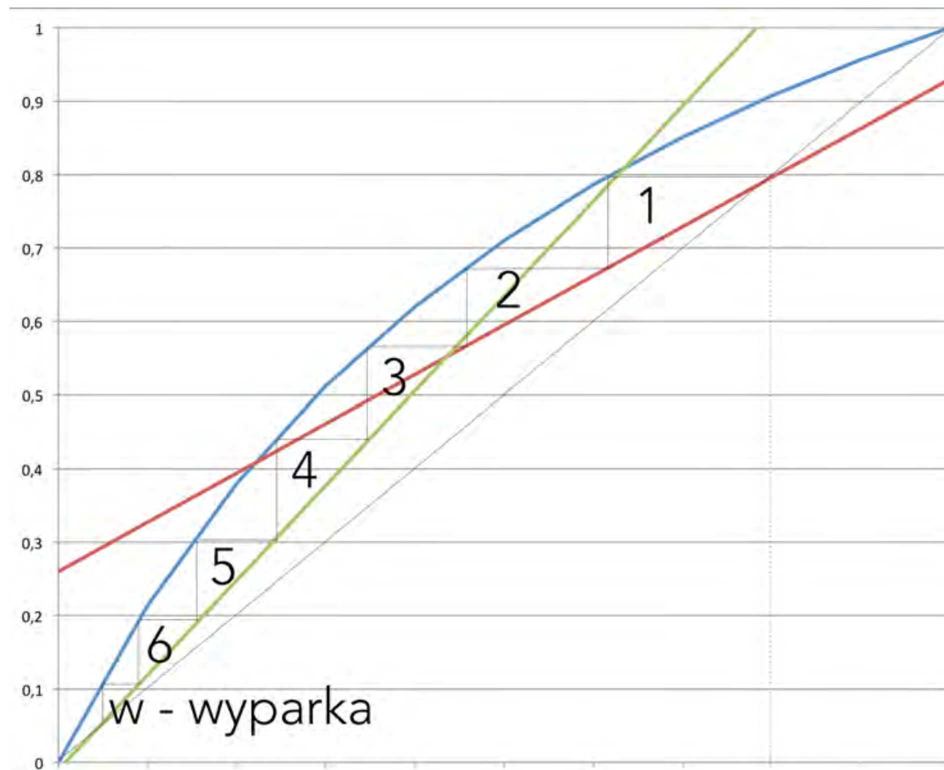
Dla wariantu II:

$$n_{t,\min} = \frac{\ln\left[\dfrac{0,95(1-0,05)}{0,05(1-0,95)}\right]}{\ln 2,45} - 1 = 5,6 \cong 6$$

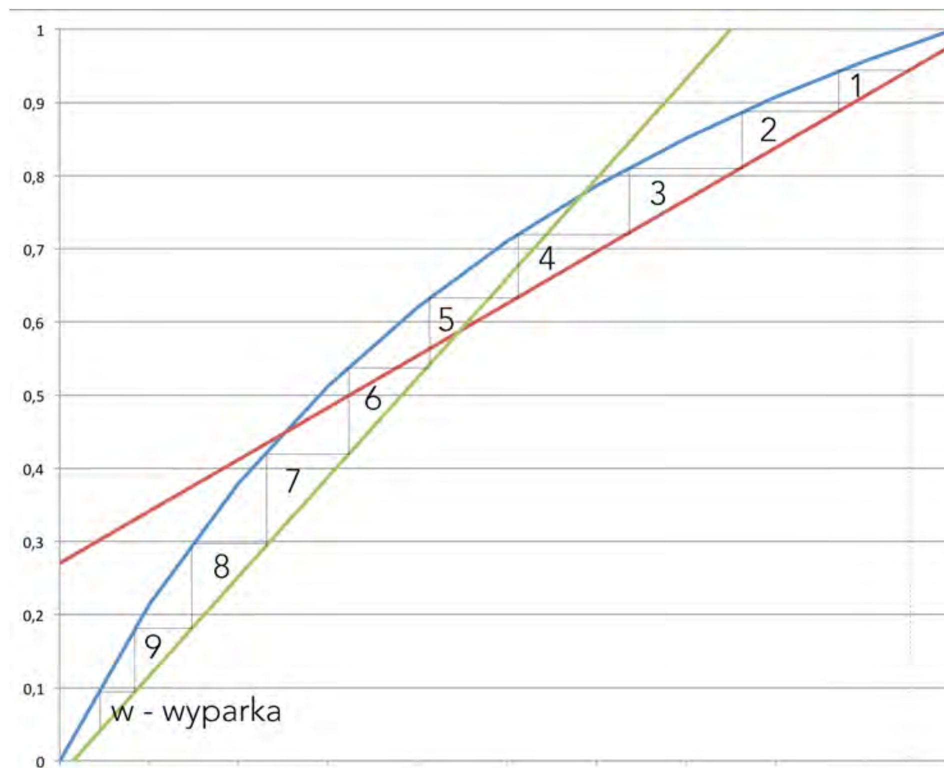
Z obliczeń wynika, że w pierwszym wariancie minimalna liczba półek nie może być mniejsza niż 4, a w drugim 6.

5.19. Wyznaczanie liczby półek metodą graficzną McCabe'a – Thielego

Dla wariantu I, (q=1):



Dla wariantu II,



Z przedstawionych wykresów widać, że ilości liczby półek teoretycznych są podobne do wyników liczonych metodą matematyczną. Wyniki mogą się różnić ponieważ metoda graficzna jest mniej dokładna.

VI. ZESTAWIENIE WYNIKÓW I WNIOSKI

Po wykonaniu szeregu obliczeń mających na celu wyznaczenie liczby półek teoretycznych w kolumnie rektyfikacyjnej otrzymano wyniki, które zestawiono w poniższych tabelach 3 oraz 4.

założenie	**q=0,6** $x_D = 0,80 \frac{kmolA}{kmol}$	**q=1** $x_D = 0,80 \frac{kmolA}{kmol}$
D	$D = 29,33 \frac{kmol}{h}$	$D = 29,33 \frac{kmol}{h}$
W	$W = 25,76 \frac{kmol}{h}$	$W = 25,76 \frac{kmol}{h}$
y_R^*	$y_R^* = 0,67$	$y_R^* = 0,67$
$\Psi_{\min}$	$\Psi_{\min} = 1,364$	$\Psi_{\min} = 1,364$
GLO	$y = 0,67x + 0,26$	$y = 0,67x + 0,26$
Ψ'	$\Psi' = 3,62$	$\Psi' = 4,48$
V	$V = 89,33 \frac{kmol}{h}$	$V = 89,33 \frac{kmol}{h}$
L'	$L' = 93 \frac{kmol}{h}$	$L' = 115 \frac{kmol}{h}$
V'	$V' = 67,33 \frac{kmol}{h}$	$V' = 89,33 \frac{kmol}{h}$
DLO	$y = 1,38x - 0,02$	$y = 1,29x - 0,01$
N_{tg}	$N_{tg} = 3$	$N_{tg} = 3$
N_{td}	$N_{td} = 4$	$N_{td} = 3$
N_t	$N_t = 7$	$N_t = 6$
N_{rz}	$N_{rz} = 10$	$N_{rz} = 9$

Tabela 3. Zestawienie wyników obliczeń dla różnej wartości parametru q, przy $x_D = 0,80 \frac{kmolA}{kmol}$

x_D	**q=1** $x_D = 0,80 \frac{kmolA}{kmol}$	**q=1** $x_D = 0,95 \frac{kmolA}{kmol}$
D	$D = 29,33 \frac{kmol}{h}$	$D = 24,4 \frac{kmol}{h}$
W	$W = 25,76 \frac{kmol}{h}$	$W = 30,56 \frac{kmol}{h}$
y_R^*	$y_R^* = 0,67$	$y_R^* = 0,67$
$\Psi_{\min}$	$\Psi_{\min} = 1,364$	$\Psi_{\min} = 1,64$
GLO	$y = 0,67x + 0,26$	$y = 0,71x + 0,27$
Ψ'	$\Psi' = 4,48$	$\Psi' = 3,76$
V	$V = 89,33 \frac{kmol}{h}$	$V = 84,4 \frac{kmol}{h}$
L'	$L' = 115 \frac{kmol}{h}$	$L' = 115 \frac{kmol}{h}$
V'	$V' = 89,33 \frac{kmol}{h}$	$V' = 84,4 \frac{kmol}{h}$
DLO	$y = 1,29x - 0,01$	$y = 1,36x - 0,02$
N_{tg}	$N_{tg} = 3$	$N_{tg} = 5$
N_{td}	$N_{td} = 3$	$N_{td} = 5$
N_t	$N_t = 6$	$N_t = 10$
N_{rz}	$N_{rz} = 9$	$N_{rz} = 14$

Tabela 4. Zestawienie wyników obliczeń dla różnego udziału molowego $x_D = 0,80$ *i* $x_D = 0,95 \frac{kmolA}{kmol}$*, składnika A w destylacie dla parametru q=1*

W Tabeli 5, zebrano wyniki obliczeń minimalnej liczby półek, które otrzymano przy zastosowaniu metody graficznej oraz Fensky'ego.

Zastosowana metoda	Wariant I	Wariant II
Fensky'ego	4	6
graficzna	7	10

Tabela 5, Zestawienie wyników obliczeń minimalnej liczby półek dwoma metodami

Po analizie powyższych wyników widać, że na ilość półek teoretycznych jak i rzeczywistych mają wpływ różne czynniki.

W pierwszym przypadku obliczenia były prowadzone dla różnych parametrów stanu surówki *q,* 0,6 i 1, przy jednakowym udziale molowym składnika A równy $x_D = 0,80 \frac{kmolA}{kmol}$. Z obliczeń wynika, że zmiana tego parametru ma istotny wpływ na ilość półek rzeczywistych w kolumnie. Opierając się o dokładniejszą metodę analityczną otrzymano liczbę półek rzeczywistych, dla $q=0,6$ to N_{rz}=10, natomiast dla $q=1$ to N_{rz}=9.

W drugim przypadku zostały przeprowadzone obliczenia dla różnego udziału molowego składnika A w destylacie $x_D = 0,95 \frac{kmolA}{kmol}$ – czyli chcemy uzyskać więcej składnika A. Ten przypadek pokazuje jak wiele wartości ulega zmianie. Liczba rzeczywistej liczby półek dla $q=1$ wynosi N_{rz}=14.

Porównując ilości półek rzeczywistych widać jak bardzo zmienia się jej ilość. Wzrasta wraz z ilością wyższego udziału molowego składnika A. Z powyższych obliczeń można stwierdzić, że aby otrzymać więcej produktu głównego A, należy umieścić w kolumnie rektyfikacyjnej więcej półek.

LITERATURA CYTOWANA

1. J. Karcz, A. Zaborowska, *Wybrane problemy rachunkowe z zakresu procesów wymiany masy*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej. Szczecin 1988.

2. R. Koch, A. Kozioł, *Dyfuzyjno–cieplny rozdział substancji*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994.

3. M. Serwiński, *Zasady Inżynierii Chemicznej – operacje jednostkowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1971.

4. J. D. Hepworth, D. R. Waring, M. J. Waring, *Chemia związków aromatycznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.

5. J. Bandrowski, L. Troniewski, *Destylacja i rektyfikacja*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1980.

6. Praca zbiorowa, *Poradnik Fizykochemiczny*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1974.

7. J. Warych, *Aparatura Chemiczna i procesowa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1994.

8. Z. Ziółkowski, *Destylacja i rektyfikacja w przemyśle chemicznym*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1966.

STRONY INTERNETOWE

[w1] www.merckmillipore.pl (29.IV.2013)

[w2] http://pl.wikipedia.org/wiki/Toluen (20.IV.2013)

[w3] http://www.ciop.pl/14022 (19.V.2013)

Załącznik I **Udziały składnika bardziej lotnego w fazie ciekłej x_A i gazowej y_A oraz współczynniki lotności względnej $\alpha = \frac{y_A}{1-y_A} \cdot \frac{1-x_A}{x_A}$ przy stałym ciśnieniu i zmiennej temperaturze**

Roztwór \ Udział molowy składnika bardziej lotnego w cieczy	x_A	0,00	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	1,00	Ciśnienie
Kwas octowy—bezwodnik kwasu octowego	y_A	0,000	0,115	0,219	0,416	0,557	0,669	0,743	0,801	0,855	0,904	0,950	0,975	1,000	$1010 \cdot 10^2$ Pa (760 mm Hg)
	α		2,48	2,51	2,85	2,93	3,02	2,9	2,7	2,53	2,35	2,11	2,5		
Octan etylu—kwas octowy	y_A	0,000	0,157	0,305	0,511	0,649	0,752	0,841	0,916	0,970	0,988	0,997	0,9975	1,000	$1000 \cdot 10^2$ Pa (750 mm Hg)
	α		3,52	3,95	4,20	4,3	4,55	5,3	7,6	13,8	20,6	36,8	21,0		
Woda—kwas octowy	y_A	0,000	0,0974	0,178	0,315	0,433	0,529	0,618	0,702	0,783	0,860	0,934	0,9685	1,000	
	α		2,04	1,94	1,84	1,78	1,68	1,61	1,58	1,56	1,54	1,58	1,67		
Woda—kwas mrówkowy	y_A	0,000	0,0240	0,0495	0,121	0,229	0,377	0,535	0,683	0,801	0,893	0,952	0,9787	1,000	$1000 \cdot 10^2$ Pa (750 mm Hg) azeotrop $x_A = y_A = 0,43$
	α		0,47	0,47	0,55	0,69	0,91	1,15	1,48	1,73	2,09	2,20	2,40	—	
Etanol—woda	y_A	0,000	0,271	0,431	0,559	0,606	0,642	0,681	0,725	0,776	0,839	0,908	0,9529	1,000	$66,5 \cdot 10^2$ Pa (50 mm Hg)
	α		7,05	6,8	5,05	3,60	2,7	2,13	1,76	1,48	1,30	1,03	1,06		
Etanol—woda	y_A	0,000	0,322	0,437	0,532	0,575	0,614	0,652	0,703	0,754	0,821	0,898	0,947	1,000	$1010 \cdot 10^2$ Pa (760 mm Hg) azeotrop $x_A = y_A = 0,87$
	α		9,01	6,98	4,56	3,15	2,38	1,87	1,58	1,32	1,14	0,99	0,935		
Benzen—toluen	y_A	0,00	0,11	0,21	0,37	0,51	0,62	0,71	0,79	0,85	0,91	0,96	0,98		$1010 \cdot 10^2$ Pa (760 mm Hg)
	α	2,3	2,36	2,4	2,34	0,243	2,44	2,45	2,50	2,43	2,52	2,67	2,66	2,52	
Propan—izobutan	y_A	0,00	0,09	0,17	0,33	0,47	0,58	0,68	0,76	0,83	0,9	0,95	0,975		$10,8 \cdot 10^5$ Pa (11 at)
	α		1,87	1,84	1,97	2,08	2,07	2,11	2,11	2,09	2,25	2,12	2,05	4,00	

Załącznik 1**. Udziały składnika A w fazie ciekłej x_A, i gazowej y_A* ***[8]